



Ingeniería y Desarrollo
ISSN: 0122-3461
ISSN: 2145-9371
Fundación Universidad del Norte

Estudio exploratorio de arcilla expandida y piedra pómez como agregados en la producción de concretos ligeros

Baquero Sanabria, Brayan Armando; Güiza Galeano, Robinson Arvey; García Marín, Fredy Mauricio
Estudio exploratorio de arcilla expandida y piedra pómez como agregados en la producción de concretos ligeros
Ingeniería y Desarrollo, vol. 37, núm. 2, 2019
Fundación Universidad del Norte
Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85263724005>
DOI: 10.14482/inde.37.2.1624

Estudio exploratorio de arcilla expandida y piedra pómez como agregados en la producción de concretos ligeros

Exploratory study of expanded clay and pumice stone as added in the production of light concretes

Brayan Armando Baquero Sanabria¹
bbaquerosan@uniminuto.edu.co

Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia

Robinson Arvey Güiza Galeano²
aguizagalea@uniminuto.edu.co

Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia

Fredy Mauricio García Marín^{3*}
garciamari@uniminuto.edu.co

Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia

Ingeniería y Desarrollo, vol. 37, núm. 2,
2019

Fundación Universidad del Norte

Recepción: 29 Noviembre 2018
Aprobación: 20 Mayo 2019

DOI: 10.14482/inde.37.2.1624

CC BY

Resumen: Esta investigación experimental se realizó con el objetivo de implementar materiales como la arcilla expandida (también conocida como arlita) y piedra pómez como reemplazo total de los agregados convencionales en la producción de concreto. Los diseños de mezclas fueron desarrollados con arcilla expandida y piedra pómez totalmente saturados y sin saturar. La mezcla consistió de cemento, agua, piedra pómez y arcilla expandida; en algunos casos se emplearon aditivos como fibras de polipropileno, humo de sílice y superplastificante; estos últimos se utilizaron para estudiar el incremento en la resistencia a la flexión y compresión del concreto. Para ello se elaboraron cilindros, viguetas y paneles; se obtuvieron densidades de 1300 a 1500 Kg/m³ y resistencias a la compresión de 13 a 18 MPa. Acompañados por ensayos de densidad de equilibrio para concretos ligeros, porcentaje de vacíos, absorción capilar y microscopía electrónica de barrido (SEM); con el fin de identificar algunas propiedades de los agregados y el concreto. De esta manera se puede demostrar que la arcilla expandida y la piedra pómez pueden considerarse como una alternativa a los agregados comunes en la producción de concreto en el país.

Palabras clave: arcilla expandida, concreto ligero, densidad, piedra pómez, resistencia mecánica.

Abstract: This experimental research was carried out with the objective of implementing materials such as expanded clay (also known as arlite) and pumice stone, as a total replacement of conventional aggregates in the production of concrete. Mix designs were developed with expanded clay and pumice stone completely saturated and unsaturated. The mixture consisted of cement, water, pumice stone and expanded clay, in some cases additives were used such as polypropylene fibers, silica fume and superplasticizer, the latter was used to study the increase in the resistance to bending and compression of concrete. For this, cylinders, joists and panels were made; obtaining densities of 1300 to 1500 Kg / m³ and compressive strengths of 13 to 18 MPa. Accompanied by equilibrium density tests for lightweight concrete, percentage of voids, capillary absorption and scanning electron microscopy (SEM); in order to identify some properties of the aggregates and concrete. In this way it can be shown that expanded clay and pumice can be considered as an alternative to common aggregates in the production of concrete in the country.

Keywords: arlita, concrete, density, light, pumice, resistance.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el concreto u hormigón es el material más utilizado en la industria de la construcción, porque facilita la edificación de obras civiles con diversidad de tamaños y geometrías, lo cual lo convierte en un material de construcción universal [1], [2]. Sin embargo, el peso propio, la alta densidad del material es un parámetro negativo en el diseño de estas infraestructuras.

Una alternativa muy importante para la reducción en su peso son los concretos ligeros, los cuales presentan una menor densidad; ya que estas mezclas se componen principalmente de materiales que permiten obtener una alta porosidad, por la cantidad de sistemas de vacíos presentes en su estructura interna [3], [4].

Los romanos iniciaron la elaboración de los concretos ligeros, utilizando en sus mezclas agregados naturales de los depósitos volcánicos [5]. Pero fue hasta el siglo XIX cuando se logró su maduración, gracias al desarrollo de agregados ligeros manufacturados como la escoria de hulla (carbón). La aplicación de este material no se limitó solamente a la vivienda, también se utilizó en partes de edificios y monumentos, con la idea principal de optimizar las propiedades físicas de las estructuras, especialmente su peso propio.

En la actualidad existe una gran cantidad de concretos ligeros, ya sea por la adición de un medio espumoso (hormigón celular) o por la adición de materiales como caucho (desecho de llantas de vehículos) [6], [7], poliestireno expandido [8] o por subproductos de procesos industriales agrícolas como la palma de aceite [9], [10], [11], que actualmente se ha investigado en más oportunidades. Estos materiales ofrecen alternativas que pueden ser útiles para la aplicación de concretos ligeros en estructuras, no necesariamente grandes.

El concreto convencional tiene una densidad entre 2300 - 2500 Kg/m³ [12], y la del concreto ligero se encuentra en el rango de 1400 - 2000 Kg/m³.

En esta investigación se utiliza la piedra pómez y arcilla expandida como agregados ligeros, a los cuales se les adiciona fibras de polipropileno y humo de sílice.

La piedra pómez es uno de los agregados ligeros más utilizados en la construcción, con buena resistencia mecánica y baja masa unitaria (estructura porosa), gracias a su proceso de formación [13]. Investigaciones enfocadas en las propiedades del concreto ligero con este agregado [14], [15], [16] indican que la mezcla puede satisfacer los requerimientos de los concretos estructurales semi ligeros [17] demostrados en paneles de pared estructural.

Por su parte, la arcilla expandida, o también conocida como arlita, es un material de origen cerámico extraído de canteras a cielo abierto, cuya expansión se lleva a cabo en hornos rotativos a 1.200 °C [18]. Los concretos estructurales livianos elaborados con arlita, cemento y arena

permiten lograr dosificaciones que alcanzan resistencias a la compresión equiparadas con las obtenidas con piedra partida o canto rodado [19], [20].

En la utilización de los agregados ligeros se presenta una alta absorción de agua que tiende a reducir la trabajabilidad cuando se elabora la mezcla. Por lo tanto, estos agregados son pre humedecidos para evitar la absorción del agua de amasado y afectar mínimamente la trabajabilidad del concreto [5].

Esta investigación se realiza con la intención de impulsar en este país la investigación, relacionada con la producción de concretos ligeros, promoviendo la implementación de nuevos materiales que le aporten a la ligereza, manejabilidad, propiedades térmicas y acústicas sin afectar la resistencia.

Es por ello que se elaboran mezclas con dosificaciones de aditivos (humo de sílice y fibras de polipropileno), tanto con los agregados ligeros en estado seco y saturado, además de la realización de ensayos de laboratorio que permitan caracterizar el material, estudiando cada una de sus propiedades físicas, mecánicas y microestructurales. De tal manera que nos permita evaluar su aplicación en la construcción de obras civiles en el país.

2. METODOLOGÍA

Selección de materiales y caracterización

Cuando hablamos de concreto ligero hacemos referencia a una amplia gama de agregados y aditivos con los cuales es posible obtener este material. En este caso la investigación se llevó a cabo mediante la implementación de agregados ligeros, de baja densidad, alta porosidad y una alta absorción. Este es el caso de la arcilla expandida (arlita), la cual es un material de origen cerámico con una estructura porosa resultante de la expansión a altas temperaturas de arcilla pura extraída de canteras [21]; este proceso le confiere además una alta resistencia que la convierte en un material versátil en la construcción; entre sus usos encontramos aislantes, cubiertas planas e inclinadas, rellenos, estabilización de suelos, hormigones ligeros estructurales y prefabricados [22]. Por otro lado, tenemos la piedra pómez, la cual es una roca de origen ígneo resultante del rápido proceso de enfriamiento que sufre el magma cuando es expulsado a la superficie, dando origen a estas rocas volcánicas [23]. La arcilla expandida se trabajó con un tamaño nominal de 6-12 mm y la piedra pómez corresponde a un tamaño nominal de 4 mm.



Figura 1

Arcilla expandida y piedra pómez

Fuente: elaboración Propia.

Para la producción del concreto ligero se utilizó cemento portland tipo 1 o de uso general; adicionalmente se planteó la posibilidad de mejorar sus propiedades de resistencia a la tracción y compresión, por lo que se usaron fibras de polipropileno y humo de sílice, el cual demanda la adición de plastificante.

La caracterización del cemento y los agregados del concreto ligero se realizó siguiendo los parámetros establecidos por el Instituto Nacional de Vías [24]; dentro de los ensayos tenemos densidades, pesos unitarios, tiempo de fraguado, humedad, absorción del agregado y desgaste usando la máquina de los ángeles.

Selección del método de diseño de mezcla

Para el diseño de mezcla del concreto ligero se evaluaron inicialmente los métodos de diseño del American Concrete Institute (ACI 211) y otro siguiendo las recomendaciones de la Norma Técnica Colombiana (NTC), de los cuales se determinó que el mejor diseño para un concreto convencional de 21 Mpa fue el método NTC; sin embargo, al momento de realizar el diseño del concreto ligero se encontraron los siguientes problemas: la densidad de los agregados es menor de 1000 Kg/m^3 , razón por la cual no funciona esta metodología, y la absorción de los agregados llega hasta el 70 % para el caso de la pómez, por lo que se planteó utilizar los agregados en estado saturado y superficialmente seco (SSS) con el fin de evitar el ajuste de corrección por absorción en el diseño.

Teniendo en cuenta lo expuesto se recurrió a un diseño volumétrico o relación de fases (tabla 1), con el cual fue posible llevar a cabo la investigación. Los porcentajes de agregado se escogieron deliberadamente, y este se mantuvo a lo largo de los ensayos. Sin embargo, durante la elaboración de las mezclas se decidió utilizar el agregado saturado y con su humedad natural, por lo que se presentan resultados en estado SSS y seco.

Tabla 1
Diseño de mezcla concreto ligero

DISEÑO DE MEZCLA CONCRETO LIGERO (SSS)	
Distribución volumétrica	
Relación Agua/Cemento	0,48
Volumen de pasta (%)	40,00%
Volumen de cemento (%)	16,89%
Volumen de agua (%)	23,11%
Volumen de arlita (%)	40,00%
Volumen de pómez (%)	17,00%
Volumen de aire (%)	3,00%

Fuente: elaboración Propia.

Elaboración probetas concreto ligero

Con el diseño de mezcla definido se elaboraron probetas cilíndricas de 10 x 20 cm, viguetas de sección transversal cuadrada de 15 cm de lado y una longitud de 50 cm, con las cuales se evaluarán las propiedades mecánicas. Además, se elaboraron mezclas de concreto con adición de fibras de polipropileno y humo de sílice, utilizados por separado y en combinación.



Figura 2
Probetas concreto ligero

Fuente: elaboración Propia.

Ensayos concreto ligero

Los ensayos llevados a cabo se realizaron en estado fresco y endurecido. Una vez elaborada la mezcla se determina el asentamiento [25]. Los especímenes fueron curados con película plástica, se realizaron ensayos de compresión [26] a los 7, 14 y 28 días para el caso de los cilindros, las viguetas se fallaron a flexión por el método de la viga cargada en el punto central [27] a los 28 días de curado. Adicionalmente se llevaron a cabo

los ensayos de densidad, absorción y porcentaje de poros del concreto endurecido (C642) [28] y tasa de absorción de agua del concreto por capilaridad (C1585) [29], así como la evaluación de la propiedad térmica midiendo la transferencia de calor en placas de concreto. Además de un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) para analizar algunas propiedades de los agregados y el concreto ligero.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El concreto ligero es un material que se caracteriza principalmente por su baja densidad y resistencia a la compresión sin embargo, los avances en la construcción han permitido mejorar las propiedades de este material y se ha llegado a producir concretos livianos de alto desempeño que tienen una alta resistencia a la compresión y mantienen las propiedades del concreto ligero [30]. Según el código ACI-318, un concreto ligero estructural deber tener como mínimo una resistencia a la compresión de 17 MPa a los 28 días y una densidad máxima de 1840 kg/m^3 . Sin embargo, su baja densidad y alta resistencia no son los únicos atributos que posee este concreto ligero; también posee una mejor trabajabilidad, porosidad, adherencia, resistencia al fuego, durabilidad, baja conductividad térmica y aislamiento acústico, propiedades que aumentan sus usos en la construcción más allá de un concreto estructural, y es precisamente lo que se quiere comprobar con este estudio [31].

Caracterización de los materiales

Conocer las propiedades de los agregados que se van a utilizar es indispensable para realizar un diseño de mezcla. A continuación se muestra un resumen de los ensayos realizados para cada uno de los materiales.

Tabla 2
Resultados caracterización de los materiales

RESULTADOS CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	
Cemento	
Densidad (INV-307)	2.850 Kg/m ³
Tiempo de fraguado (INV -305)	255 min
Arcilla expandida	
Densidad Seca (INV -222)	1.034 Kg/m ³
Densidad SSS (INV -222)	1.100 Kg/m ³
Absorción (INV-222)	12,70%
Humedad (INV-122)	0,25%
Desgaste (Máquina de los ángeles) (INV-218)	41,86%
Peso unitario suelto (INV-217)	1.598 Kg/m ³
Piedra pómez	
Densidad Seca (INV-222)	748 Kg/m ³
Densidad SSS (INV-222)	1.272 Kg/m ⁴
Absorción (INV-222)	70,04%
Humedad (INV-122)	25,00%
Peso unitario suelto (INV-217)	2.046 Kg/m ³

Fuente: elaboración Propia.

Esto permitió comprobar la baja densidad de los agregados y los elevados porcentajes de absorción que influyen drásticamente en la corrección por absorción en el diseño de mezcla y, por ende, en la relación agua cemento, razón por la que se trabajaron los agregados en estado saturado, aunque posteriormente se trabajaron en estado seco.

Ensayos en concreto ligero

Los ensayos específicos como la absorción, densidad de equilibrio, aislamiento térmico y acústico se realizaron únicamente con la mezcla de concreto ligero, mientras que la compresión de cilindros, asentamiento y densidad en estado endurecido se realizaron para todas las mezclas de concreto ligero con/sin adiciones (tabla 3).

Tabla 3
Asentamiento-relación A/C

MEZCLA	RELACIÓN A/C	ASENTA (cm)	MEZCLA	RELACIÓN A/C	ASENTA (cm)
Ligero	0,48	14,70	Ligero seco	0,70	13,00
Ligero+ humo sílice	0,48	11,00	Ligero seco + humo sílice	0,70	16,50
Ligero+ fibras	0,48	11,50	Ligero seco + fibra	0,70	15,50
Ligero+ fibra+ sílice	0,48	10,50	Ligero Seco + fibra+ sílice	0,70	15,00

Fuente: elaboración Propia.

Ensayos en estado fresco

La manejabilidad del concreto se determina con el ensayo de asentamiento, y es uno de los ensayos en estado fresco que determina la calidad del concreto en una etapa inicial, siendo causal de rechazo o aceptación, pues de ello depende su aplicación, resistencia y capacidad de ser moldeado con facilidad, además de que garantiza la homogeneidad del material disminuyendo el número de vacíos [32]. En el diseño de mezcla se definió un asentamiento esperado de 10 cm (4"); sin embargo, el método de diseño usado no garantizaba este resultado, por lo que fue necesario realizar mezclas de prueba hasta encontrar que para el asentamiento planteado se necesitaba una relación A/C de 0,48 (tabla 3).

Ensayos en estado endurecido

Densidad y Resistencia a la compresión

El ensayo de compresión se realizó a los 7, 14 y 28 días. De esta forma se elaboraron las gráficas de esfuerzo-deformación y resistencia para cada edad de curado, al tiempo que se registraban sus pesos y dimensiones para determinar la densidad de las muestras en estado endurecido.

Tabla 4
Densidad-Resistencia promedio

MEZCLA	DENSIDAD PROMEDIO (Kg/m ³)	RESISTENCIA PROMEDIO (MPa)	MEZCLA	DENSIDAD PROMEDIO (Kg/m ³)	RESISTENCIA PROMEDIO (MPa)
Ligero	1.327,20	13,43	Ligero seco	1.383,06	15,38
Ligero+ sílice	1.445,46	17,76	Ligero seco+ sílice	1.428,81	17,73
Ligero+ Fibras	1.470,22	14,51	Ligero seco+ fibra	1.432,08	15,31
Ligero+ fibra+ sílice	1.444,24	17,96	Ligero seco+ fibra+ sílice	1.453,33	18,41

Fuente: elaboración Propia.

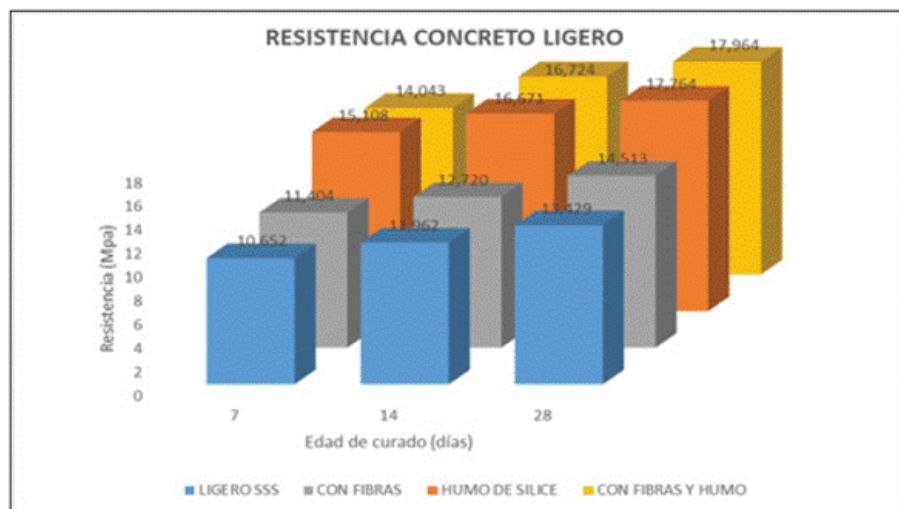


Figura 3
Resistencia vs. Edad de curado - Concreto ligero sss
Fuente: elaboración Propia.

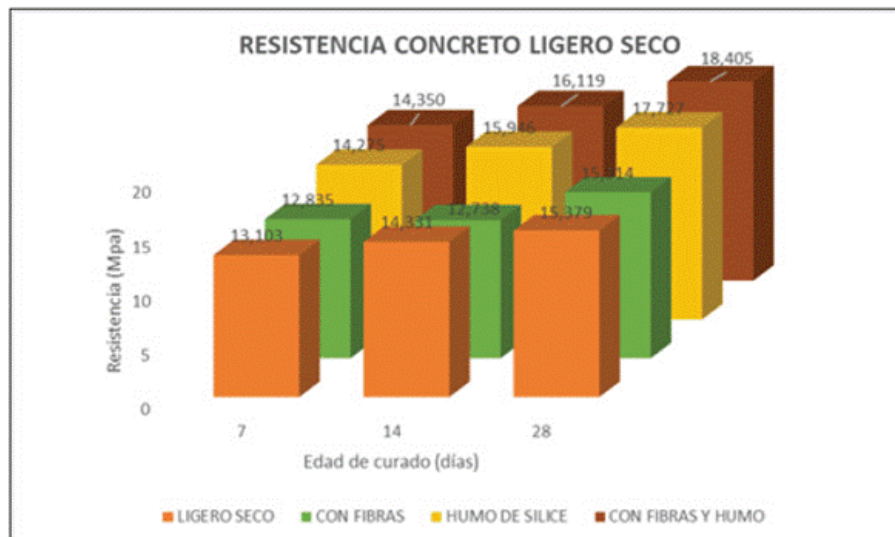


Figura 4
Resistencia vs. Edad de curado - Concreto ligero seco
Fuente: elaboración Propia.

La resistencia a la compresión mide la calidad de las mezclas desarrolladas en el proyecto de manera neta, rápida y eficaz; determinando un margen de seguridad estructural. Los resultados obtenidos muestran un aumento gradual de la resistencia, lo cual es el comportamiento típico de un concreto. La adición de fibras y humo de sílice representaron un aumento del 33 % para el caso del concreto ligero con agregados en estado saturado y de un 20 % para el concreto ligero con agregados en estado natural; este comportamiento se debe principalmente a la adición de humo de sílice, pues las fibras le proporcionan una mayor adherencia al momento de presentarse una falla. Se evidenció además que el uso del agregado en estado natural obtuvo una resistencia superior al concreto con agregado saturado, cerca de 15 %. Sin embargo, esto genera un aumento considerable en la relación a/c de la mezcla, que si bien no afecta la resistencia, sí lo hace con la consistencia, y se obtiene un concreto más fluido y difícil de manejar, pues si bien el material presenta una alta absorción, no se sabe con certeza la velocidad de absorción, ya que los ensayos se realizan saturando el agregado durante 24 horas.

Si comparamos los resultados obtenidos con un concreto convencional con una resistencia de diseño de 21 MPa, para el cual se requieren 478 Kg/m³ de material cementante, y se obtuvo una densidad de 2200 kg/m³; encontramos una reducción en la densidad de hasta un 40% cuando en el diseño de concreto ligero se usaron 481 kg/ m³ de material cementante; sin embargo, esa disminución en la densidad también influye en la resistencia a la compresión, registrando una pérdida de hasta el 30 %.

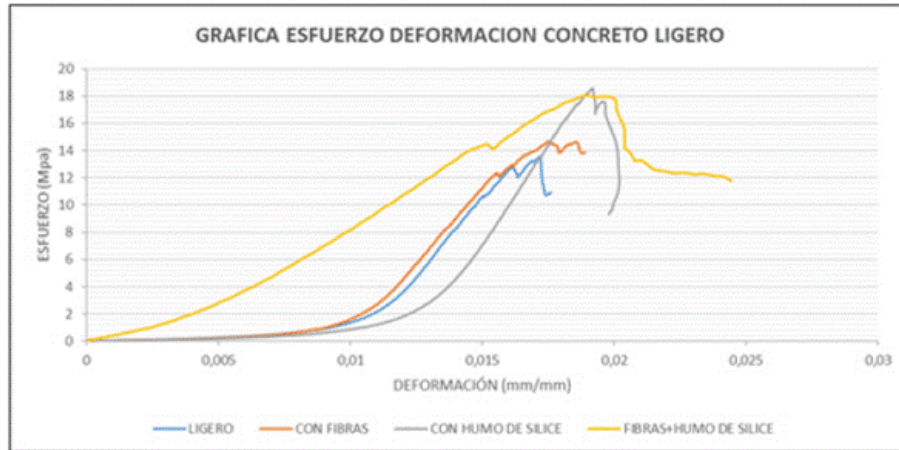


Figura 5
Esfuerzo-deformación mezclas concreto ligero
Fuente: elaboración Propia.

Los diagramas de esfuerzo deformación permiten analizar las propiedades del concreto como la tenacidad, ductilidad y módulo de elasticidad. Se dice que un material frágil es aquel que llega a la rotura sin mucha deformación; en estructuras, un material frágil no es deseable, ya que tiene roturas sin previo aviso, llegando al colapso de forma inmediata; mientras que un material dúctil es aquel que al llegar a la rotura ha sufrido grandes deformaciones [33]. Con base en lo anterior es posible afirmar que el concreto ligero muestra un comportamiento frágil, pues registra poca deformación y su falla es súbita. Por otro lado, el módulo de elasticidad se define como la pendiente que forma la línea recta de la zona elástica [34], por lo que la mezcla de concreto ligero con adición de fibras y humo de sílice tiene un módulo de elasticidad mayor, por ende, posee una mayor rigidez.



Figura 6
Tipos de falla concreto ligero
Fuente: elaboración Propia.

Resistencia a la flexión

Para determinar la resistencia a la flexión se elaboraron dos viguetas: una de concreto ligero sin ninguna adición y otra con adición de fibras y humo de sílice, las cuales se fallaron a 28 días, por el método de la viga cargada en el centro. Con los resultados obtenidos se calculó el módulo de rotura para cada mezcla.

Ecuación 1. *Módulo de rotura*

$$\text{Módulo de rotura} = \frac{M * c}{I} = \frac{\left(\frac{P * L}{4}\right) * c}{\frac{b * h^3}{12}}$$

Tabla 5

Módulo de rotura viguetas concreto ligero

ENSAYO DE FLEXIÓN VIGUETAS CONCRETO LIGERO		
Muestra	Fuerza (Kn)	Modulo rotura (MPa)
Ligero	13,167	2,580
Ligero +f +h	13,180	2,783

Fuente: elaboración Propia.

El módulo de rotura se define como el esfuerzo máximo en la fibra cuando se produce el fallo [35]. Según estudios realizados existe una correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión, donde el módulo de rotura se encuentra entre un 10 y 20 % de la resistencia máxima [36]; para nuestro ensayo, el módulo de rotura corresponde al 15 % de la resistencia a la compresión y se evidenció un aumento en la resistencia a la flexión con la adición de fibras y humo de sílice.

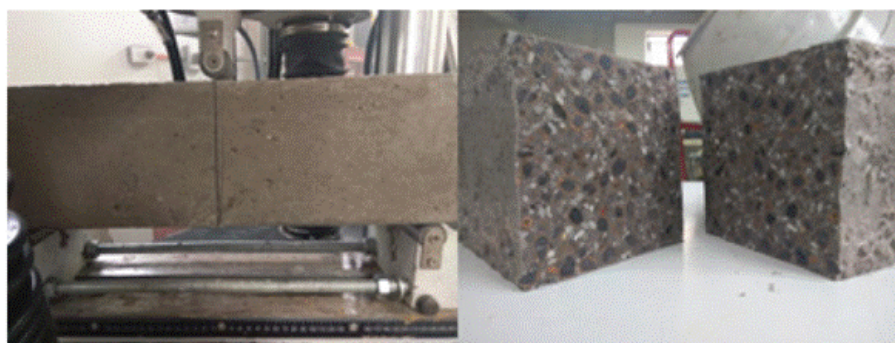


Figura 7

Ensayo de resistencia a la flexión

Fuente: elaboración Propia.

Densidad, absorción y porcentaje de huecos del mortero celular

El ensayo de densidad, absorción y huecos del concreto endurecido se desarrolló según los parámetros de la norma Astm-C642; en el ensayo, las probetas fueron secadas en el horno por 24 horas, posteriormente sometidas a inmersión durante 48 horas y a ebullición durante 5 horas; esto con el fin de determinar el porcentaje de vacíos permeables del concreto y la absorción del material en cada etapa del ensayo.

Tabla 6

Resultados ensayo de absorción y poros permeables

ASTM C-642: Densidad, absorción y huecos del concreto endurecido			
Concreto	Absorción (inmersión)	Absorción (Ebullición)	Poros permeables
Convencional	10,80%	11,00%	21,30%
Ligero	23,38%	23,64%	27,33%

Fuente: elaboración Propia.

Cuando se quiere conocer la porosidad de un material existen varios métodos para encontrarla; sin embargo, este método resulta más fácil de ejecutar, ya que no requiere equipos complejos de laboratorio. De los resultados se evidencia que el concreto ligero posee una alta absorción respecto a un mortero convencional, y aunque posee un mayor porcentaje de poros permeables, la absorción después de la ebullición no aumentó considerablemente, lo cual nos indica que existe una baja interconexión entre los poros existentes en la matriz del concreto.

Absorción capilar del mortero celular

La medición de la tasa de absorción de agua para hormigones de cemento hidráulico (Astm-C1585) es un método utilizado para determinar la capacidad de absorción de agua del hormigón de cemento hidráulico, midiendo el aumento en la masa de una muestra resultante de la absorción de agua como una función del tiempo cuando solo una superficie de la muestra se expone al agua; esta absorción ocurre debido a la capilaridad del hormigón y se garantiza un flujo ascendente. Para cada espécimen se tomaron muestras de la parte externa e interna y se expuso una de sus caras en agua durante 6 días, en los cuales registraron los pesos a intervalos de 0, 1, 5, 10, 20, 30 y 60 minutos, posteriormente se registró una medida diaria.

El ensayo de tasa de absorción de agua del concreto, nos brinda indicador de la interconexión existente entre los poros que conforman el concreto, ya que el garantizar un flujo ascendente obliga al agua a atravesar los poros o cavidades que contenga la muestra. La figura 8 muestra el comportamiento de la tasa de absorción del concreto ligero, en donde se observa una baja absorción inicial (parte lineal), mientras que la absorción secundaria resultó ser mayor. Además, se evidencia una mayor absorción

de la muestra interna del concreto; esto se debe a que allí quedan expuestos los agregados y estos contribuyen al aumento en la absorción. La tasa de absorción máxima registrada fue de 10,82 mm, y para un mortero convencional se obtuvo una absorción interna de 11,51 mm, lo cual nos indica que el concreto ligero es un material cuya baja densidad se debe principalmente a la ligereza de sus agregados, ya que en su estructura no registra alta porosidad y no posee redes de poros interconectados [37].

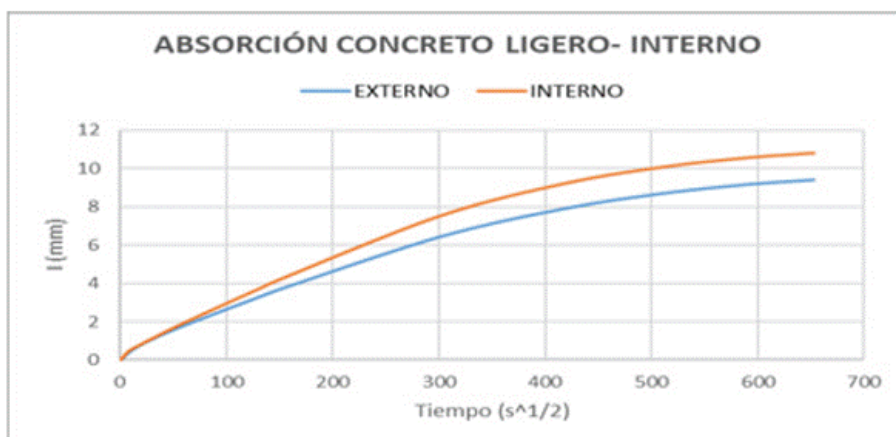


Figura 8

Tasa de absorción concreto ligero

Fuente: elaboración Propia.

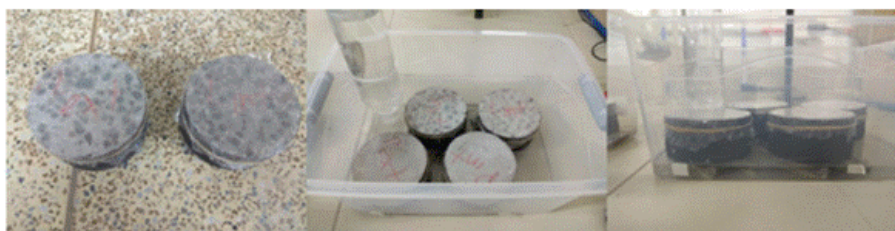


Figura 9

Ensayo de absorción capilar-concreto ligero

Fuente: elaboración Propia.

Análisis microscopia electrónica de barrido (SEM)

Con el análisis realizado en el microscopio electrónico de barrido (SEM) se pudo comprobar la microestructura de cada una de las muestras, en donde se observó a detalle la composición, topografía, alteraciones o deformaciones y señales particulares de las muestras. Además, este permite realizar un análisis químico mediante espectroscopia por dispersión de energía (EDS). A continuación se presentan algunas de las imágenes obtenidas a 100, 200 y 1000 aumentos, así como el espectro resultante del análisis químico.

Las muestras sometidas al análisis de microscopia electrónica de barrido, nos permitieron conocer la microestructura de los agregados (figura10), en donde se evidenció la alta porosidad de estos. Vale la pena resaltar que la piedra pómez presenta una estructura con un mayor número de poros y un tamaño menor a los 20 μ m; esto se logró comprobar

con la ayuda del software de procesamiento de imágenes "ImageJ", el cual permite hacer una medición del diámetro de los poros. La figura 11 corresponde a la microestructura del concreto ligero, la cual muestra una estructura compacta con poros diminutos ($<10\text{ }\mu\text{m}$) y una buena adherencia de los agregados. La microestructura del concreto con adición de fibras y humo de sílice (figura 12) se observa claramente la adherencia con los agregados en este caso la piedra pómez, al igual que con las fibras de polipropileno, las cuales tienen un diámetro aproximado de $154\text{ }\mu\text{m}$ ($0,154\text{ mm}$).

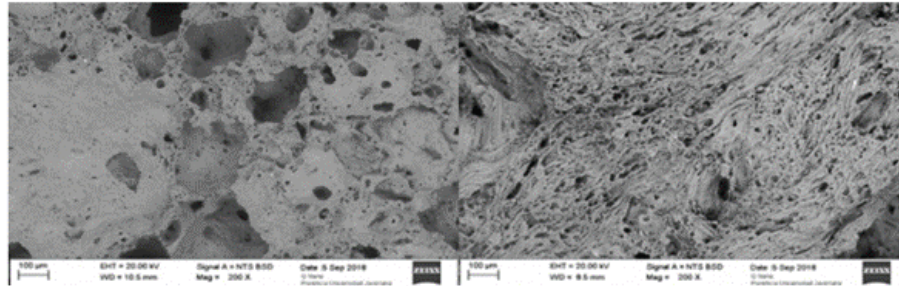


Figura 10

Microestructura agregados: acilla expandida (izquierda) - piedra pómez (derecha)

Fuente: elaboración Propia.

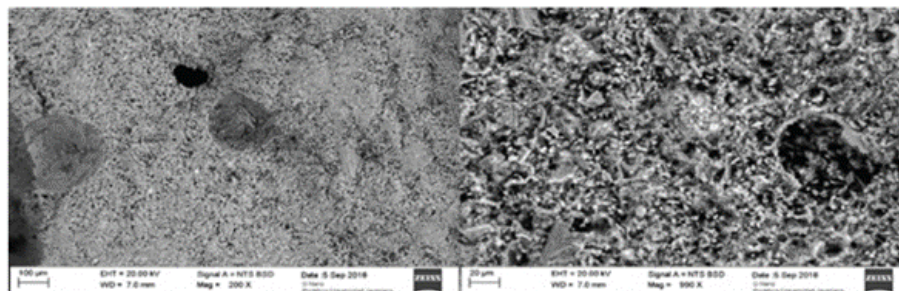


Figura 11

Microestructura concreto ligero

Fuente: elaboración Propia.

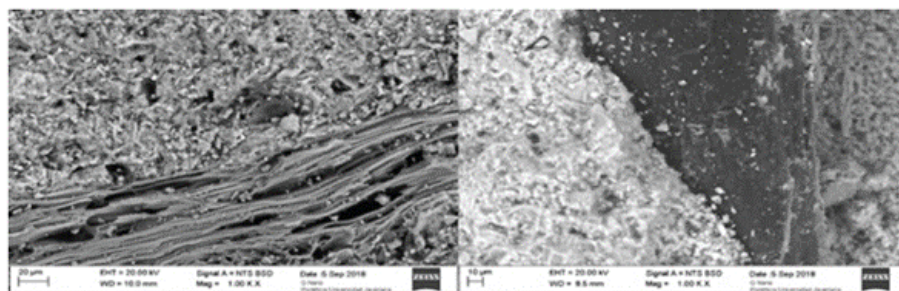


Figura 12

Microestructura concreto ligero con adición de fibras y humo de sílice

Fuente: elaboración Propia.

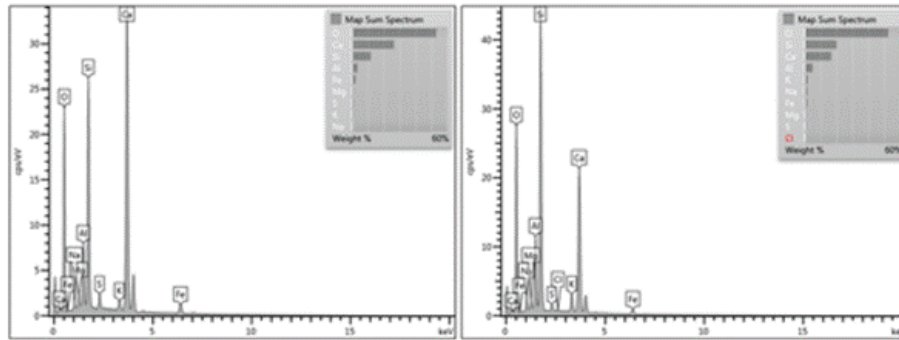


Figura 13

Espectro análisis químico concreto ligero con/sin aditivos

Fuente: elaboración Propia.

Del análisis químico obtenido mediante espectroscopia se evidencia que la adición de fibras y humo de sílice no solo aumenta la concentración de silicio, también aumenta las de aluminio, cloro, sodio y potasio. Esto conlleva a la presencia de cloruro de sodio, el cual puede ser perjudicial para el concreto reforzado pues el acero podría resultar en corrosión [38].

Transferencia de calor

El ensayo de aislamiento térmico o transferencia de calor se llevó a cabo siguiendo algunos de los parámetros establecidos en la norma Astm C-177. Las mediciones de flujo de calor y propiedades de transmisión térmica mediante el aparato de placa caliente vigilado [39], en el cual se establecen parámetros y recomendaciones para llevar a cabo el ensayo utilizando el aparato de placa caliente, placas frías u otros instrumentos. Si bien el montaje que se ejecutó no cumple a cabalidad con las especificaciones de la norma, puede considerarse como un indicador de esta propiedad del mortero celular, aunque sería necesario profundizar en su análisis.

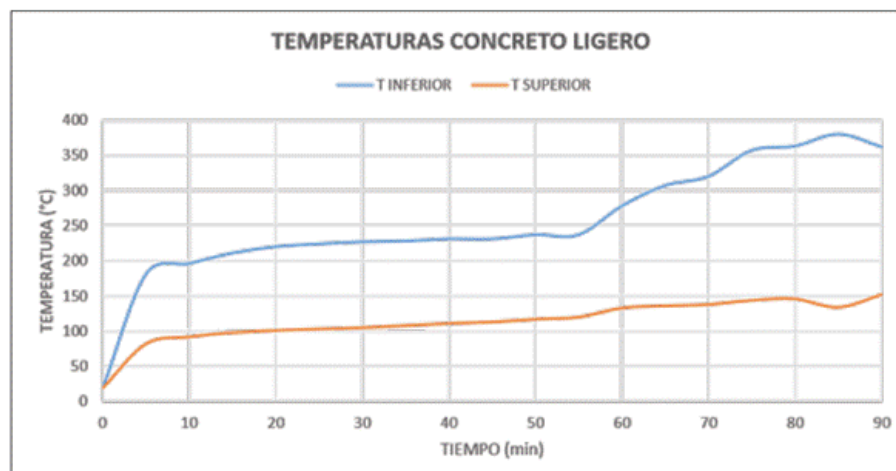


Figura 14

Registro temperaturas placa concreto ligero

Fuente: elaboración Propia.

Las mediciones se realizaron mediante monitores de temperatura y termocuplas tipo "j" y "k" capaces de medir hasta 800 y 1.200 °C; además de ello se monitoreó la temperatura ambiente dentro de la cámara, al igual que la temperatura lateral. Las probetas usadas para llevar a cabo el ensayo fueron placas de 15 x 15 cm y 5 cm de espesor, que fueron sometidas al fuego durante 90 minutos, utilizando como fuente de calor un mechero bunsen. Se graficaron los datos de la temperatura inferior (expuesta al fuego) y la temperatura superior; los datos se registraron cada 5 minutos.



Figura 15

Panel ensayo de transferencia de calor

Fuente: elaboración Propia.

Las temperaturas registradas permiten observar que el mortero patrón tuvo una transferencia del 42 % respecto a la temperatura inferior, la cual está expuesta al fuego. La figura 14 muestra una tendencia a mantener la misma transferencia de calor a través del tiempo, lo que se refleja en la equidistancia entre las curvas de temperatura. Por su parte, la placa de mortero convencional registró una transferencia de calor del 62 %, lo cual corrobora la eficiencia del concreto ligero como aislante térmico.

4. CONCLUSIONES

Basado en los resultados de esta investigación y de la discusión de los mismos se presentan las siguientes conclusiones:

Las mezclas de concreto ligero con arcilla expandida y piedra pómez en estado seco presentan mejores características físico-mecánicas que las mezclas realizadas con estos agregados en estado saturado y superficialmente seco. La adición de fibras de polipropileno y humo de sílice aumentan la densidad promedio de la mezcla de un 5 a 8 %, con el beneficio en el incremento de la resistencia media de hasta un 30 %.

La elaboración de concreto ligero con arcilla expandida y piedra pómez como reemplazo total de los agregados puede considerarse como una alternativa a los materiales convencionales, ya que se alcanzan resistencias medias a la compresión y de aislamiento considerables para la elaboración de muros divisorios, paneles y bloques. Aunque por sí solo no cumple con los requisitos para ser un concreto ligero estructural, se puede alcanzar este uso mediante la implementación de aditivos que mejoren sus propiedades o plantear un reemplazo parcial de los agregados convencionales.

El concreto ligero logra una reducción cercana del 37 % en la densidad respecto a un concreto convencional con una resistencia de diseño $f'_c = 21\text{MPa}$; sin embargo, se presenta una reducción del 37 % en la resistencia a la compresión. La reducción de los vacíos de aire está claramente

relacionada con un aumento en la resistencia para cada densidad, lo cual implica que el efecto de los aditivos (tanto individualmente como en combinación) fue significativo.

Los resultados de cada uno de los ensayos realizados en esta investigación demuestran el potencial que puede tener el concreto ligero con agregados de arcilla expandida y piedra pómez en la aplicación como material de construcción.

REFERENCIAS

- [1] L. Gutiérrez, *El Concreto y Otros Materiales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2003.
- [2] A. Fócil, *Caracterización del Concreto Celular* elaborado con Espuma. Monterrey: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2006.
- [3] Asocreto, "Tecnología y Propiedades", *Instituto del Concreto - Asociación Colombiana de Productores De Concreto*, pp. 142-143, 2005.
- [4] D. Sánchez, "Durabilidad y patología del concreto", Instituto del concreto, pp. 36-40, 2006.
- [5] F. Sáenz, "Concreto Ligero utilizando Cáscara de Nuez", *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, vol. 9, n° 1, pp. 1-11, 2015.
- [6] A. El-Gammal, "Compressive Strength of Concrete Utilizing", *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)*, vol. 1, n. ° 1, pp. 96-99, 2010.
- [7] M. K. Haridharan, "Influence of Waste Tyre Crumb Rubber on Compressive Strength, Static Modulus of Elasticity and Flexural Strength of Concrete", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 80, n.° 1, 2017.
- [8] P. Fierro, *Análisis comparativo de la utilización del concreto simple y el concreto liviano con perlitas de poliestireno como aislante térmico y acústico aplicado a unidades de albañilería en el Perú*. Peru: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2011.
- [9] A. Abdullah, «Basic Strength Properties of Lightweight Concrete Using Agricultural Wastes as Aggregates*, Roorkee: Proceedings of International Conference on Low-cost Housing for Developing, 1984.
- [10] H. Basri, "Concrete using waste oil palm shells as aggregate", *Science Direct*, vol. 29, pp. 619-622, 1999.
- [11] D. Lee T., "Lightweight concrete made from oil palm shell (OPS): Structural bond and durability properties", *Buil*, vol. 42, n.° 7, pp. 2614-2621, 2007.
- [12] M. Abarca, "Nuevas tecnologías en concretos. Concreto celular, concreto reforzado con fibra, concreto ligero estructural", en *Congreso nacional de administración y tecnología para la arquitectura, ingeniería y diseño*, Azcapotzalco Ciudad de México, 2012.
- [13] J. Correa, Evaluación del efecto de la variación de la dosificación de agregado ligero de arcilla expandida en las propiedades físicas y mecánicas de un concreto estructural aligerado. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2015.

- [14] L. M. Hossain, "Design, strength, durability and fire resistance of lightweight concrete with pumice aggregate", *ACI Materials Journal*, vol. 104, n.º 5, pp. 449-457, 2007.
- [15] L. Gündüz, "The effects of pumice aggregate/ cement ratios on the low-strength concrete properties", *Construction and Building Materials*, vol. 22, n.º 5, pp. 721-728, 2008.
- [16] L. Cavaleri, N. Miraglia y M. Papia, "Pumice concrete for structural wall panels", *Engineering Structures*., vol. 25, n.º 1, pp. 115-125, 2003.
- [17] K. Hossain, "Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n.º 2, pp. 283-291, 2004.
- [18] A. Navarrete, *Hormigones con agregados livianos*. Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario, 2003.
- [19] D. H. Huang, "Hormigones livianos de alto desempeño", *Revista Tecnológica ESPOL*, 2009.
- [20] J. Milanino, "Hormigones con Arcilla expandida", *Hormigonar. Revista de la asociación argentina del hormigón elaborado*, n.º 4, pp. 10-13, 2004.
- [21] Weber, "Guía técnica arcilla leca", Barcelona: Saint-Gobain Weber Cemarsa, 2015.
- [22] Laterlite, "Arcilla expandida", Soluciones ligeras y aislantes Laterlite, Barcelona, 2011.
- [23] E. J. Tarbuck, *Ciencias de la tierra*, vol. 1, 8ª ed. Madrid: Pearson, 2005.
- [24] INVIAS, "Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras", Bogotá, 2015.
- [25] INVIAS, "Asentamiento del concreto (slump)-404". Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2007.
- [26] INVIAS, "Resistencia a la compresión de cilindros de concreto 410". Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2007.
- [27] INVIAS, "Resistencia a la flexión del concreto, método de la viga simple cargada en el punto central". Bogotá: Instituto Nacional de Vías, 2007.
- [28] ASTM, "Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete-C641". United States: ASTM International, 1997.
- [29] ASTM, "Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes-0585". United States: ASTM International, 2004.
- [30] L. K. Mauricio Lopez, "Hormigón liviano de alto desempeño". Georgia Institute of Technology EE.UU., pp. 59-67, 2006.
- [31] D. E. Hou Huang, J. L. Caicedo y A. A. Falconi, "Hormigones livianos de alto desempeño". *Revista Tecnológica ESPOL*, pp. 2-4, 2016.
- [32] A. Moreno, "Construcción y tecnología en concreto", 1º de junio de 2015. Available: <http://www.revistacyt.com.mx/index.php/ingenieria/467-la-importancia-de-tomar-muestras-de-concreto-variables-que-inciden-en-el-analisis-de-resultados>
- [33] "Prontubeam", diciembre de 2015. Available: http://www.prontubeam.com/articulos/12_2015_PROP_MAT/12_2015_PROP_MAT_articulo.pdf.
- [34] "UCA", 2008. Available: <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2008.pdf>.
- [35] Instron, "Instron", 2018. Available: <http://www.instron.com.ar/es-ar/our-company/library/glossary/m/modulus-of-rupture>.

- [36] G. Rivera, "Capítulo 6. Resistencia a la compresión", Universidad del Cauca, p. 138, 2010.
- [37] J. Howland, "Estudio de la absorción capilar y sorptividad de hormigones", *Materiales para la construcción*, vol. 63, n.º 0465-2746, p. 4, 2013.
- [38] J. Carrillo, J. Pulido y W. Chaparro, "Efecto del ion cloruro sobre las propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras de acero", *Ingeniería y desarrollo*, vol. 33, n.º 2, p. 150, 2015.
- [39] ASTM, "Las mediciones de flujo de calor y propiedades de transmisión térmica mediante el aparato de placa caliente vigilado-077". United states ASTM International, 1997.

Notas de autor

***Correspondencia:**

Fredy García, teléfono: 3015646832. Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons