

Hormigón estructural de baja densidad para edificaciones

Morales Gubio L. W.*, **; Santamaría Carrera J. L.*, **; Caicedo Barona W.*, **; Tipán Quinatoa F.*, **

*Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador

**Autores correspondientes

e-mail: lwmorales@uce.edu.ec

Información del artículo
Recibido: julio 2018
Aceptado: septiembre 2018

Resumen

El Ecuador se encuentra en una zona de alta peligrosidad sísmica, por lo que el diseño que demanda en las edificaciones de hormigón armado bajo una condición crítica, es el Sismo y siendo la cortante basal, la fuerza lateral aplicada en la edificación proporcional al peso de la estructura, por lo que una alternativa para atenuar esta acción sísmica sobre las estructuras de hormigón armado es disminuir el peso de los elementos estructurales mediante el uso de hormigones ligeros. Por tanto, el objetivo principal de la investigación es fabricar un hormigón de baja densidad que a su vez tenga características estructurales y además se pueda determinar mediante ensayos y correlaciones los parámetros físicos y mecánicos del hormigón ligero para que puedan ser usados como datos dentro del análisis y diseño estructural de edificaciones.

Con base en lo descrito, la investigación consiste en la elaboración de un hormigón estructural de baja densidad con el uso de agregado ligero (piedra pómez) extraída del tramo de vía San Antonio - Calacalí, agregado fino de la cantera Pifo y cemento tipo GU de uso general. El diseño de hormigón ligero estructural se basa en tres normativas: ACI 318-14: Requisitos del Código para Hormigón estructural, ACI 211.1-98: Práctica estándar para seleccionar proporciones de hormigón estructural ligero y ACI 213R-14: Guía para concreto estructural agregado ligero, las cuales proveen de tablas para la estimación de las cantidades de material, dependiendo de la resistencia que se desee alcanzar.

La dosificación para un metro cúbico de hormigón ligero estructural es de 9.2 sacos de cemento, 208 litros de agua, 792 kg de arena, 326 kg de piedra pómez y 4.6 kg de aditivo superplastificante Aditec SF - 106. Utilizando esta dosificación se consigue un hormigón ligero estructural con una resistencia a la compresión a los 28 días de 282 kg/cm² y densidad de equilibrio de 1.81 kg/cm³, además, para poder ser usado posteriormente en un modelo matemático, se obtiene el módulo de rotura, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, módulo de Poisson mediante ensayos y fórmulas de correlación del ACI. El hormigón ligero puede ser utilizado en elementos estructurales como vigas, columnas y losas, pero no puede estar con contacto directo con el agua debido a su porosidad. La disminución de la densidad del hormigón trae múltiples ventajas como la reducción de cargas, secciones, cuantía de acero e incluso costo.

Palabras clave: hormigón estructural ligero, piedra pómez, hormigón de baja densidad.

Abstract

Ecuador is located in an area of high seismic hazard, so the design demanded in reinforced concrete buildings under a critical condition, is the earthquake and being the basal shear, the lateral force applied in the building proportional to the weight of the structure, so that an alternative to mitigate this seismic action on reinforced concrete structures is to reduce the weight of structural elements by using lightweight concrete. Therefore, the main objective of the research is to manufacture a low-density concrete that in turn has structural characteristics and also can be determined by tests and correlations the physical and mechanical parameters of lightweight concrete so that they can be used as data within the analysis and structural design of buildings.

On the basis of what has been described, the investigation consists in the elaboration of a low-density structural concrete with the use of light aggregate (pumice stone) extracted from the San Antonio - Calacalí road section, fine aggregate from the Pifo quarry and GU type cement. general use. The structural lightweight concrete design is based on three standards: ACI 318-14: Code requirements for structural concrete, ACI 211.1-98 Standard practice for selecting proportions of lightweight structural concrete and ACI 213R-14: Guide for light aggregate structural concrete, which provide tables for estimating the quantities of material, depending on the resistance you want to achieve.

The dosage for one cubic meter of structural lightweight concrete is 9.2 bags of cement, 208 liters of water, 792 kg of sand, 326 kg of pumice stone and 4.6 kg of Aditec SF - 106 superplasticizer additive. Using this dosage, a concrete is obtained structural light with a 28-day compressive strength of 282 kg / cm² and equilibrium density of 1.81 kg / cm³, in addition to be used later in a mathematical model, the modulus of rupture, tensile strength is obtained, modulus of elasticity, Poisson module through tests and correlation formulas of the ACI. Lightweight concrete can be used in structural elements such as beams, columns and slabs, but cannot be in direct contact with water due to its porosity. The decrease in the density of concrete brings many advantages such as reduction of loads, sections, amount of steel and even cost.

Keywords: lightweight structural concrete, pumice stone, low density concrete.

1. Introducción

El hormigón liviano con el uso de áridos ligeros fue utilizado por los romanos en la construcción de la cúpula del Panteón de Agripa de 44 metros de diámetro, que data del año 118 y 125 d. C. [1].

Existen diversos estudios realizados en el Ecuador sobre el hormigón ligero; uno de ellos, por ejemplo, es el efectuado en la Universidad Central del Ecuador denominado:

“Análisis comparativo entre hormigón convencional y hormigón de baja densidad”, en el cual se consiguieron hormigones de densidad alrededor de los 1.88 kg/cm^3 y resistencias a la compresión a los 28 días de 180 kg/cm^2 .

En esta investigación se comprobó que se pueden obtener hormigones con densidad baja ($1,81 \text{ kg/cm}^3$), pero a la vez se planteó conseguir hormigones con resistencias mayores a los 180 kg/cm^2 , de acuerdo a los ensayos se cumplió el propósito, obteniendo resistencias de hasta 280 kg/cm^2 , que permite definir al hormigón como estructural y que este sea empleado en elementos estructurales como columnas, vigas y losas.

2. Fundamentación

El diseño de hormigón ligero estructural se basa principalmente en las siguientes normas:

- ACI 318-14: Requisitos del Código para hormigón estructural.
- ACI 211.1-98: Práctica estándar para seleccionar proporciones de hormigón estructural ligero.
- ACI 213R-14: Guía para concreto estructural agregado ligero.

3. Definiciones

Hormigón ligero estructural: hormigón que posee una resistencia a la compresión mínima a los 28 días de 17 MPa, una densidad de equilibrio entre 1120 y 1920 kg/m^3 , y consiste completamente de agregado de peso ligero o una combinación de

peso ligero y agregado de densidad normal. [2]

Densidad de equilibrio: es la densidad alcanzada por el hormigón estructural ligero después de la exposición a la humedad relativa de $50 \pm 5\%$ y una temperatura de $23 \pm 2^\circ \text{C}$ por un período de tiempo suficiente para alcanzar una densidad que cambia menos del 0,5% en un período de 28 días. [2]

Agregado ligero: es aquel que tiene un peso volumétrico seco suelto como máximo 880 kg/m^3 , mientras que para el agregado normal las densidades oscilan entre 14440 a 1769 kg/m^3 . [3]

4. Formulación de objetivos y establecimiento de hipótesis

4.1 Objetivo general

- Fabricar un hormigón ligero estructural que pueda usarse como material para el análisis y diseño de edificaciones.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar la resistencia a la compresión simple del hormigón ligero a los 7, 14 y 28 días.
- Obtener la densidad de equilibrio que defina al hormigón como ligero.
- Establecer el módulo de rotura.
- Definir la resistencia a la tracción.
- Calcular mediante fórmulas o correlaciones el módulo de elasticidad E_c del hormigón ligero.

4.3 Hipótesis

Es posible conseguir un hormigón de baja densidad que a su vez posea una resistencia estructural con el uso de piedra pómez.

5. Materiales, fuentes y métodos

5.1 Materiales

El desarrollo del proyecto se centra en la provincia de Pichincha, donde se utilizará materiales locales. El hormigón ligero tiene varios componentes como son, el cemento Portland tipo IP, arena de peso normal, agua, aditivo y piedra pómez.

Piedra pómez

Piroclasto de caída con un tamaño comprendido entre 2 y 64 mm, generado en erupciones explosivas a partir de la fragmentación de la lava que recubre las burbujas de gas que ascienden hacia la superficie y explotan por la diferencia de su presión interna con la del entorno. [4]

Agregado fino

El agregado fino consiste en arena natural proveniente de canteras aluviales o de arena producida artificialmente. La forma de las partículas es generalmente cúbica o esférica y razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas. La arena natural es constituida por fragmentos de roca limpios, duros, compactos, durables. [4]

Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. [5]

Agua

El agua es un componente esencial en las mezclas de concreto y morteros, pues permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante.

El agua utilizada en la elaboración del concreto y mortero debe ser apta para el consumo humano, libre de sustancias como aceites, ácidos, sustancias alcalinas y materias orgánicas. [6]

Aditivo superplastificante

Los aditivos plastificantes y superplastificantes de hormigón son aditivos para hormigón capaces de mejorar las propiedades del hormigón.

Se emplean para conferir al hormigón fresco un mejor comportamiento en cuanto a trabajabilidad y bombeabilidad, pero también se busca con su uso mejorar significativamente la resistencia y la durabilidad del hormigón final. [7]

5.2 Fuentes

La calidad del hormigón depende del tipo de agregado que se utilice en la construcción. En Quito operan 65 canteras que abarcan 1.739 hectáreas, distribuidas en las parroquias de San Antonio de Pichincha, Píntag, Calderón, Pifo, Lloa y Guayllabamba.

Según el Municipio, el 69% corresponde a concesiones otorgadas a particulares, el 27% a autorizaciones de libre aprovechamiento para obra pública y 4% a permisos para minería artesanal. Además, hay aquellas que trabajan de manera ilegal. [8]

Buena parte de los materiales de construcción para la ciudad provienen del norte de Quito, la mayoría de los sitios de extracción de los agregados se ubican en el tramo de vía Quito-Mitad del Mundo - Perucho, en la provincia existen otras fuentes de materiales como Guayllabamba, Pifo, Calacalí, Lloa, Píntag, entre otras, de donde se puede obtener los agregados para la fabricación del hormigón.

Para el desarrollo de este estudio del hormigón ligero se utilizó los agregados provenientes de las zonas de Pifo y Mitad del Mundo - Calacalí.

5.3 Métodos

Muestra

La piedra pómez fue extraída del tramo de la vía Mitad del Mundo-Calacalí, sector La Cruz, el agregado fino de peso normal de la cantera de Pifo, Cemento Holcim G.U. y el aditivo ADITEC SF-106 que se adquirió de la empresa Aditec Ecuatoriana Cía. Ltda.

Técnicas

Se efectuó los ensayos de laboratorio a los agregados, basándose en las normas INEN y ASTM que justifiquen la calidad de los materiales que van a intervenir en el proceso de fabricación del hormigón ligero.

6. Recopilación de datos

6.1 Ensayos de caracterización de los materiales

Para la caracterización de los agregados se realizaron varios ensayos en el laboratorio que incluyen la determinación de la densidad aparente real, suelta y compactada, granulometría, absorción, y contenido de humedad.

Tabla 1. Datos de las propiedades de los agregados

	Unidad	Arena	Pómez
Contenido de humedad (CH)	%	0.89	5.79
Contenido de absorción (CA)	%	2.57	33.61
Densidad en estado SSS (DSSS)	(gr/cm ³)	2.58	1.23
Densidad seca compactada (DSC)	(gr/cm ³)	1.7	0.53
Densidad seca suelta (DSS)	(gr/cm ³)	1.57	0.47
Módulo de finura (MF)	---	3.02	2.78
Tamaño nominal máximo TNM	pulgada		3/8"

Fuente: Los autores

Peso específico del cemento Holcim G.U.

P.E. = 2.90 gr/cm³

7. Diseño del hormigón estructural ligero

El método se basa principalmente en la norma ACI 211.2-98 Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete.

Este método de diseño es aplicable para mezclas hechas con agregado gruesos ligeros, agregados finos ligeros y agregado finos de peso normal, el cual proporciona la secuencia de pasos para poder hacer la dosificación del hormigón ligero. [9]

Proceso para el diseño de mezclas de hormigón ligero

1) Estudio de las especificaciones de la obra.

Dependiendo de la resistencia y densidad requeridas se procederá al diseño del hormigón ligero.

2) Definición de la resistencia promedio requerida

Cuando una instalación productora de concreto no tenga registros de ensayos de resistencia en obra para el cálculo de Ss que se ajuste a los requisitos de la desviación estándar, el f'cr debe determinarse de la tabla 2.

Tabla 2. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
f'c < 21	f'cr = f'c + 7.0
21 ≤ f'c ≤ 35	f'cr = f'c + 8.3
f'c > 35	f'cr = 1.10 f'c + 5.0

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Requisito de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318S-08. Impreso en U.S.A. Año 2008. Pág.: 72.

3) Estimación del revenimiento

Elección del revenimiento si no se especifica, el ACI proporciona una tabla de revenimiento con valores recomendados para cada tipo de elementos estructurales que se desea construir.

Tabla 3. Revenimiento recomendado para diferentes elementos estructurales

Elemento estructural	Revenimiento(mm)	
	Máximo	Mínimo
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas	100	25
Sistemas de piso (losas)	75	25

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98). Impreso en U.S.A. Año 2004. Pág.: 211.2-5.

4) *Estimación del agua de la mezcla y el contenido de aire*

La cantidad de agua por unidad de volumen para obtener el revenimiento deseado depende del tamaño máximo, de la forma y de la graduación del agregado, del contenido de aire y de los aditivos químicos que se

empleen, no depende en gran medida de la cantidad del cemento. La tabla 4 proporciona una estimación del agua requerida dependiendo del tamaño máximo de agregado y la cantidad de aire. La forma y la textura de los agregados influye en la cantidad de agua, pero los valores de la tabla dan una suficiente aproximación para esta primera estimación.

Tabla 4. Requerimientos aproximados de agua de mezcla para diferentes revenimientos y tamaño máximo de agregado

Tamaño máximo de agregado	3/8" (9.5mm)	1/2" (12.7mm)	3/4" (19mm)
Concreto con aire incluido			
Agua en Kg/m³ de concreto			
Revenimiento de 25 mm a 50 mm	181	175	166
Revenimiento de 75 mm a 100 mm	202	193	181
Revenimiento de 125 mm a 150 mm	211	199	187
Contenido total de aire recomendado para diferentes niveles de exposiciones, %			
Exposición ligera	4.5	4	4
Exposición moderada	6	5.5	5
Exposición extrema	7.5	7	6
Concreto sin aire incluido			
Agua en kg/m³ de concreto			
Revenimiento de 25 mm a 50 mm	208	199	187
Revenimiento de 75 mm a 100 mm	228	217	202
Revenimiento de 125 mm a 150 mm	237	222	208
Contenido aproximado de aire atrapado en el concreto sin aire incluido en %			
	3	2.5	2

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98). Impreso en U.S.A. Año 2004. Pág.: 211.2-5.

En la tabla se indica los niveles recomendados de contenido de aire con respecto a la exposición que tendrá el concreto en servicio. Estos valores mejoran el manejo y la durabilidad de la mezcla, ayudando a reducir la masa de esta.

Según el ACI 213R-03, Capítulo 3, Tabla 3.1 se tiene valores de contenido de aire recomendado para el concreto ligero para diferentes tamaños máximos nominales.

Tabla 5. Contenido de aire recomendado para el concreto ligero.

Tamaño máximo de agregado	Contenido de aire por % en volumen
3/4" pulgada (19mm)	4.5 a 7.5
3/8" pulgada (10mm)	6 a 9

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete (ACI 213R-03). Impreso en U.S.A. Año 2003. Pág.: 213R-9.

5) Selección de la relación aproximada agua cemento

En la relación agua-cemento w/c a emplear, no solo interviene la resistencia requerida sino también factores como la durabilidad y las propiedades finales deseadas. Dado que cuando se utilizan diferentes agregados y cementantes con la misma relación agua cemento resultan diferentes resistencias, es deseable desarrollar una relación entre la resistencia y w/c para cada material que se utilice.

Tabla 6. Relación entre w/c y resistencia a compresión del concreto.

Resistencia a compresión a 28 días MPa	Relación aproximada agua - cemento, por masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
41.4	0.41	----
34.5	0.48	0.4
27.6	0.57	0.48
20.7	0.68	0.59
13.8	0.82	0.74

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98). Impreso en U.S.A. Año 2004. Pág.: 211.2-6.

6) Cálculo de la cantidad de cemento

Una vez que la cantidad de agua y la relación w/c han sido estimados, se puede obtener fácilmente la cantidad de cemento por unidad de volumen del concreto que es determinada dividiendo la cantidad de agua por la relación w/c.

$$Cemento \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{Cantidad\ de\ agua}{\frac{w}{c} (para\ f'cr)}$$

Ecuación N. 1

7) Determinación del contenido del agregado grueso ligero

Agregados con el mismo tamaño máximo nominal y graduación producen concretos

con una manejabilidad satisfactoria con un apropiado volumen de agregado grueso, en la tabla 7 se proporciona una estimación de dicho volumen, este valor depende solamente del tamaño máximo del agregado y módulo de finura del agregado fino.

Tabla 7. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

Tamaño máximo del agregado (mm)	Volumen del agregado grueso del suelto en horno por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de arena				
	pulgada	mm	2.4	2.6	2.8
3/8	9.5	0.58	0.56	0.54	0.52
1/2	12.7	0.67	0.65	0.63	0.61
3/4	19	0.74	0.72	0.7	0.68

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98). Impreso en U.S.A. Año 2004. Pág.: 211.2-6.

8) Determinación del contenido del agregado fino

A la finalización del paso 7, se han estimado todos los ingredientes del concreto excepto el agregado fino. A la determinación de la cantidad de arena se puede llegar por dos caminos que resultan al final en establecer el valor por diferencia.

El primer camino se refiere a que en ocasiones por experiencias en este tipo de mezclas se puede conocer la masa volumétrica con suficiente aproximación y una vez obtenido este valor, se determina la masa por diferencia, en ausencia de dichas experiencias, se puede recurrir a la tabla 8 que proporciona una primera estimación basada en el factor de gravedad específica del agregado grueso y el contenido de aire.

Tabla 8. Primera estimación de la masa volumétrica del concreto ligero fresco compuesto por agregado grueso ligero y arena de masa normal.

Factor de gravedad específica	Primera estimación de la masa volumétrica del concreto ligero, kg/m ³		
	Concreto con aire incluido		
	4%	6%	8%
1	1596	1561	1519
1.2	1680	1644	1608
1.4	1769	1727	1691
1.6	1852	1810	1775
1.8	1935	1899	1858
2	2024	1982	1941

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98). Impreso en U.S.A. Año 2004. Pág.: 211.2-7.

9) Ajustes en las proporciones de la mezcla

Consiste en ajustar las mezclas por humedad y absorción a los agregados, la cantidad de agua que aportarán o absorberán los agregados, según esto se realiza una corrección al valor total de agua, de esta manera se tiene una primera estimación de las cantidades a emplear en la mezcla de concretos ligeros.

Dosificación del hormigón ligero estructural f'c 280 kg/cm².

Tabla 9. Cantidades por metro cúbico de hormigón ligero estructural

Material	Pesos kg	Dosificación
Agua	208	0.45
Cemento	462.22	1
Arena	792.40	1.71
Pómez	326.54	0.71
Aditivo	4.62	0.01

Fuente: Los autores

Tabla 10. Cantidades para 12 cilindros Ø=10cm, h=20cm.

Material	Pesos kg	Dosificación
Agua	6.820	0.44
Cemento	15.501	1.00
Arena	26.573	1.71
Pómez	10.951	0.71
Aditivo	0.1550	0.01

Fuente: Los autores

8. Proceso de fabricación del hormigón ligero

Para la fabricación del hormigón ligero se debe seguir algunos pasos en el mezclado:

1. La piedra pómez debe cumplir con los requisitos de tamaño y granulometría descritos en la norma ASTM C330: Especificación estándar para agregados livianos para concreto estructural.
2. Antes de iniciar con el proceso de fabricación del hormigón estructural ligero al agregado liviano (piedra pómez) se le sumerge en el agua aproximadamente 24 horas, es preferible usar a la piedra pómez en estado saturado en superficie seca (S.S.S.), debido a que tiende a absorber menos agua y no se vea afectada el agua de diseño de la mezcla.
3. Se procede a pesar los materiales calculados para la mezcla, el proceso de mezclado se realizó mediante la concreteira a la cual previamente se humedeció antes de colocar los componentes del hormigón ligero.
4. En las mezcladoras de eje vertical es importante primero colocar en el tambor el agregado grueso ligero (piedra pómez) y seguidamente con la concreteira en marcha se añade las 2/3 parte del agua de diseño para la pre-saturación, una forma de guiarse es que cuando el material está en ese estado las partículas no se pegan a las paredes de la concreteira, al agregado ligero se lo deja mezclar por unos 50 segundos aproximadamente.
5. Con mucho cuidado se hace girar el tambor hasta una posición que permita colocar el

agregado fino (arena), cemento y colocar las $\frac{3}{4}$ partes del agua de diseño.

6. Dejar mezclar por unos 2 minutos, se considera que a mayor tiempo de mezclado influye beneficiosamente en la docilidad del hormigón fresco con este tipo de agregado.
7. Se procede a añadir el aditivo con el agua restante de la mezcla y extender el tiempo de mezclado mínimo de 3 minutos hasta obtener una mezcla fluida y proceder a la descarga en una bandeja grande.
8. Debido a la baja densidad que presenta el agregado la compactación del hormigón varía, ya que el comportamiento del árido en el hormigón difiere del árido de densidad normal. Puesto que los áridos livianos tienden a amortiguar fuertemente las vibraciones, mientras que los áridos de peso normal se compactan al poco tiempo. Pasa lo mismo el momento de expulsar el aire contenido después de la compactación, ya que la movilidad de los áridos de peso normal en el hormigón resulta más favorable que para agregados de baja densidad, por lo cual, el número de inmersiones de la varilla y el número de golpes con el mazo se estima al doble. A continuación, se presenta la tabla 11, que resume los parámetros adoptados para la mezcla.

Tabla 11. Pautas para la elaboración de cilindros de hormigón ligero

Mezcla	HLE
Pre-saturación del agregado (seg)	50
Tiempo total de mezcla (seg)	6
Número de penetraciones de varilla	30
Número de golpes de martillo de caucho	25

Fuente: (Caiza & Martínez, 2015, págs. 21-40)

8. Tratamiento de las variables

La determinación de las propiedades en estado fresco se realizó mediante varios ensayos, entre los que destacan la consistencia que se determinó mediante el ensayo de cono de Abrams ASTM C143, densidad fresca ASTM C138, y homogeneidad.

A los 28 días se midió las propiedades mecánicas más importantes entre las principales resistencias a la compresión ASTM C39, módulo de elasticidad ASTM C469, densidad seca ASTM C567, ensayo de tracción indirecta ASTM C496 y módulo de rotura ASTM C78.

9. Resultados

Se realizó el control de calidad del hormigón, en estado fresco se tomó densidad y asentamiento, en estado endurecido las principales propiedades mecánicas tomadas a los 28 días de fabricación y la evolución de la resistencia a los 7, 14 y 28 días respectivamente.

Tabla 12. Valores de asentamientos del hormigón ligero

Canteras	Métodos	Asentamiento	Consistencia
		cm	Tipos
Pifo Mitad del Mundo-Calacalí	ASTM	8.5	Blanda
		9	Blanda
		8.5	Blanda

Fuente: Los autores

Tabla 13. Valores de densidad fresca del hormigón ligero

	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Volumen:	g	2928	2928	2928
Peso del molde:	g	1940	1940	1940
Peso del molde + muestra:	g	7655	7649	7651
Peso de la muestra:	g	5715	5709	5711
Densidad de la muestra:	g/cm ³	1.952	1.950	1.950
Densidad fresca promedio	g/cm ³	1.951		

Fuente: Los autores

Tabla 14. Valores de densidad endurecida del hormigón ligero

N.	ϕ_m cm	hm cm	V cm ³	Peso cilindro g	γ horm. g/cm ³	γ horm promedio g/cm ³
7 días						
1	10.30	20.00	1666.4	3174	1.905	1.911
2	10.27	20.10	1663.9	3208	1.928	
3	10.33	20.00	1677.2	3187	1.900	
14 días						
4	10.23	20.00	1644.9	3123	1.899	1.901
5	10.27	20.03	1658.4	3158	1.904	
6	10.30	20.03	1669.2	3172	1.900	
28 días						
7	10.57	20.10	1762.6	3376	1.915	1.919
8	10.43	19.97	1707.0	3286	1.925	
9	10.30	20.00	1666.4	3195	1.917	

Fuente: Los autores

Tabla 15. Valores de resistencia a compresión del hormigón ligero

N.	ϕ_m cm	A cm ²	Carga kg	σ kg/cm ²	σ prom. kg/cm ²
7 días					
1	10.30	83.32	18350.00	220.23	222.06
2	10.27	82.78	19120.00	230.96	
3	10.33	83.86	18030.00	214.99	
14 días					
4	10.23	82.25	21390.00	260.07	257.09
5	10.27	82.78	20730.00	250.41	
6	10.30	83.32	21730.00	260.79	
28 días					
7	10.57	87.69	25718.00	293.27	282.30
8	10.43	85.49	24203.00	283.10	
9	10.30	83.32	22542.00	270.54	

Fuente: Los autores

Tabla 16. Valores de resistencia a la tracción indirecta del hormigón ligero

N.	ϕm cm	Lm cm	Carga kg	σt kg/cm ²	σt prom. kg/cm ²	σt prom. %
10	10.47	20.00	13173.00	40.06		
11	10.40	20.03	11929.00	36.45	35.66	12.63
12	10.40	20.03	9974.00	30.48		

Fuente: Los autores

Tabla 17. Valores de módulo de rotura del hormigón ligero

N.	b cm	d cm	L cm	Carga kg	MR kg/cm ²	MR prom. kg/cm ²
V1	15.10	14.90	49.90	2280.00	33.94	
V2	15.00	15.10	50.00	2247.00	32.85	
V3	15.20	15.10	50.00	2055.00	29.65	32.14

Fuente: Los autores

Tabla 18. Valores de módulo de elasticidad del hormigón ligero

Cilindro	Densidad	Resistencia		Módulo de elasticidad	
	kg/m ³	kg/cm ²	MPa	MPa	kg/cm ²
7	1915.3	293.2	28.7	19327	197135
8	1924.9	283.1	27.7	19132	195152
9	1917.2	270.5	26.5	18590	189625

Fuente: Los autores

Los valores del módulo de elasticidad fueron calculados con la fórmula de correlación indicada en el ACI 318-14 para hormigones de densidad entre 1500 a 2500 kg/m³.

$$E_c = w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'c} \text{ en (MPa) Ecuación N. 2}$$

Siendo w_c la densidad del hormigón en kg/m³ y $f'c$ la resistencia promedio a la compresión a los 28 días en MPa.

Módulo de Poisson

Si bien esta propiedad varía ligeramente con la edad, las condiciones de prueba, y propiedades físicas

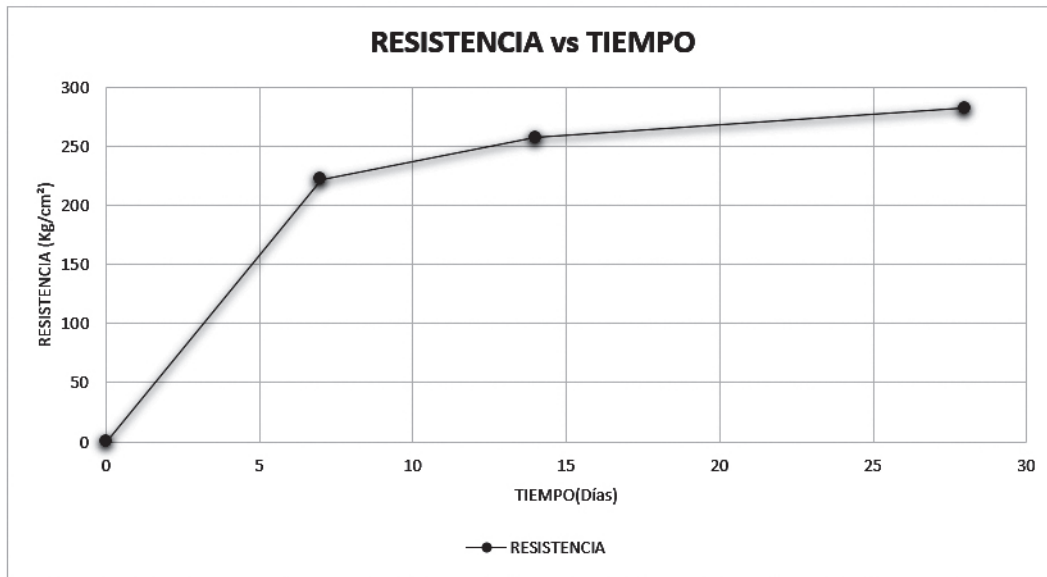
del concreto, un valor de 0.20 usualmente se asume para propósitos prácticos de diseño. [11]

Tabla 19. Datos de resistencia en diferentes edades

Tiempo	Resistencia	Evolución de resistencia
Días	kg/cm ²	%
0	0	0
7	222.1	79.3
14	257.1	91.8
28	282.3	100.7

Fuente: Los autores

Grafico 1. Resistencia a la compresión vs. Tiempo de hormigón ligero celular.



Fuente: Los autores

Densidad aparente seca

Las densidades que han sido monitoreadas son en estado endurecido a los 7, 14 y 28 días.

Tabla 20. Densidad del hormigón ligero a diferentes edades

Tiempo	Densidad
Días	kg/m ³
0	0
7	1911
14	1901
28	1919

Fuente: Los autores

Las mezclas para hormigones ligeros presentaron densidades entre 1901 kg/m³ a 1919 kg/m³, dentro del rango estipulado por el ACI 213R-03, y resultaron ser 13.77% más livianos que la misma mezcla combinada con piedra pómez y árido fino de peso normal.

10. Conclusiones

1) Con la combinación de agregado grueso liviano y agregado fino de peso normal, se llegó a obtener hormigones ligeros, con buenas ca-

racterísticas físicas y mecánicas, cuyos datos a futuro servirán para disponer de un material ligero y con ello realizar un modelo matemático aplicando a un proyecto estructural real de una edificación.

- Debido al alto porcentaje de absorción de la piedra pómez, las densidades obtenidas a los pocos días de haber retirado de la cámara de curado son mayores a la densidad de equilibrio cuyos valores están en el rango de 1810 a 1830 kg/m³, y además cumplen con la especificación de densidad del ACI 318S-14.
- El uso de la piedra pómez como agregado grueso tiende a disminuir la resistencia a la compresión del hormigón, por ello se vio necesario aumentar la cantidad de cemento, tener una relación agua cemento más baja, y la utilización de aditivo superplasticante para compensar esta disminución en la resistencia y que a su vez sea trabajable.
- Se obtuvieron valores de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón ligero estructural apropiadas (ver tablas de la 12 a la 20), cuyos datos al compararse con valores de un hormigón convencional, cumplen los requerimientos técnicos y mecánicos para utilizarse

dentro del análisis y diseño de elementos estructurales como columnas, vigas y losas en el caso de realizar.

11. Referencias

- 1) “Lightweight Concrete—A Proven Material for Two Millennia,” Proceedings of Advances in Cement and Concrete, S. Sarkar and M. W. Grutzeck, eds., University of New Hampshire, Durham, S.C.
- 2) ACI 213-03R Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete
- 3) ASTM C330 Especificación Normalizada para Agregados Livianos para Concreto Estructural
- 4) Konstruir.com. (2013). DICCIONARIO: Definición de agregado fino. Recuperado de: http://konstruir.com/definicion/letra_a/palabra_agregado%20fino.html
- 5) IECA. (s. f.). Componentes y propiedades del cemento | Características - IECA. Recuperado de: <https://www.ieca.es/componentes-y-propiedades-del-cemento/>
- 6) Arias A., V. (2009). El agua del concreto. Elconcreto.blogspot.com. Recuperado de: <http://elconcreto.blogspot.com/2009/01/el-agua-del-concreto.html>.
- 7) EHE-08. Instrucción española de hormigón estructural
- 8) ACI, American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98). Impreso en U. S.A. Año 2004.
- 9) ACI, American Concrete Institute. Requisito de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318S-08. Impreso en U. S.A. Año 2008.
- 10) ACI, American Concrete Institute. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete (ACI 213R-03). Impreso en U. S.A. Año 2003.
- 11) Caiza, P., & Martínez, A. (2015). Fabricación de hormigones livianos con materiales volcánoclasticos (lapilli) y su influencia en la reducción de fuerzas sísmicas.

12. Elementos gráficos

Figura 1. Extracción del agregado grueso, vía Mitad del Mundo-Calacalí.



Fuente: Los autores

Figura 2. Extracción del agregado fino de la cantera Pifo.



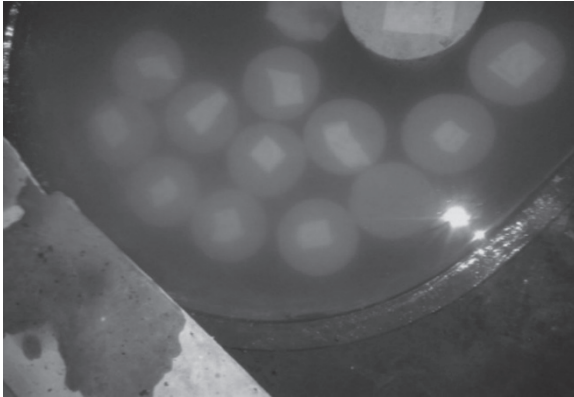
Fuente: Los autores

Figura 3. Fabricación del hormigón ligero.



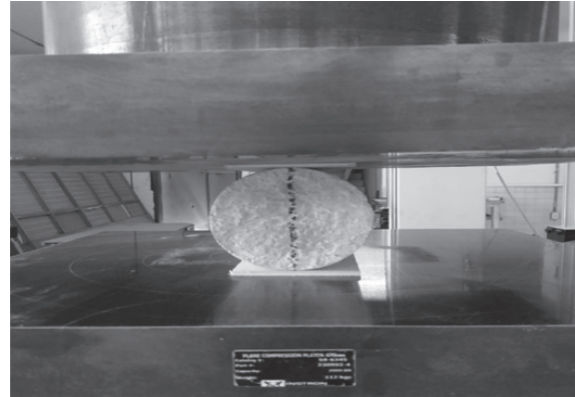
Fuente: Los autores

Figura 4. Curado del hormigón.



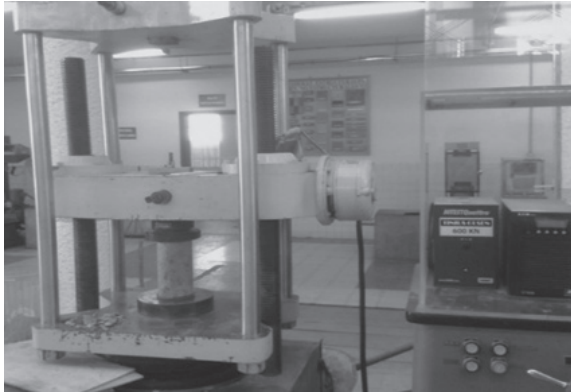
Fuente: Los autores

Figura 7. Ensayo brasileño o tracción indirecta.



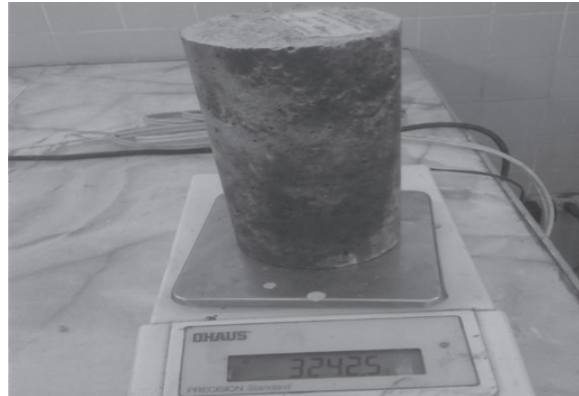
Fuente: Los autores

Figura 5. Ensayo a compresión.



Fuente: Los autores

Figura 8. Peso del cilindro para la determinación de la densidad a los 28 días.



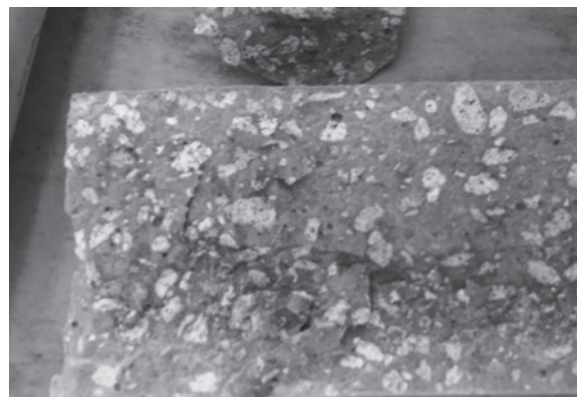
Fuente: Los autores

Figura 6. Ensayo a flexión



Fuente: Los autores.

Figura 9. Estructura interna del hormigón ligero.



Fuente: Los autores