

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERA CIVIL E INGENIERO CIVIL**

**TEMA:  
DISEÑO DE HORMIGONES LIGEROS CON DIFERENTES MATERIALES  
LOCALES Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON UN HORMIGÓN ORDINARIO**

**AUTORES:  
KATHERINE NICOLE CARRERA PAREDES  
SANTIAGO RAMIRO CHANGOLUISA YUNDA**

**TUTORA:  
LUCERO MARISOL SERRATO ARIAS**

**Quito, marzo del 2019**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Katherine Nicole Carrera Paredes, con documento de identificación N° 1722125745 y Santiago Ramiro Changoluisa Yunda con documento de identificación N° 1724749443, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado:

DISEÑO DE HORMIGONES LIGEROS CON DIFERENTES MATERIALES LOCALES Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON UN HORMIGÓN ORDINARIO, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Nombre: Carrera Paredes Katherine Nicole

Cédula: 1722125745



Nombre: Changoluisa Yunda Santiago Ramiro

Cédula: 1724749443

Quito, marzo del 2019

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Lucero Marisol Serrato Arias declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo académico: DISEÑO DE HORMIGONES LIGEROS CON DIFERENTES MATERIALES LOCALES Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON UN HORMIGÓN ORDINARIO, realizado por Katherine Nicole Carrera Paredes y Santiago Ramiro Changoluisa Yunda, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, marzo del 2019



.....  
Atentamente

Lucero Marisol Serrato Arias

C.I: 1757028897



# DISEÑO DE HORMIGONES LIGEROS CON DIFERENTES MATERIALES LOCALES Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON UN HORMIGÓN ORDINARIO

## DESIGN OF LIGHT CONCRETES WITH DIFFERENT LOCAL MATERIALS AND COMPARATIVE ANALYSIS WITH AN ORDINARY CONCRETE

Katherine Carrera-Paredes<sup>1</sup>, Santiago Changoluisa-Yunda<sup>2</sup>.

### Resumen

La presente investigación da a conocer, principalmente, la caracterización y propiedades de los agregados livianos seleccionados, en este caso, arcilla expandida y piedra pómez; de igual manera establece un método de diseño para su dosificación bajo la aplicación de normas ACI correspondientes.

En la caracterización de los agregados ligeros, específicamente en la determinación del peso específico se realizaron varias pruebas para obtener, a manera de recomendación, un procedimiento estable con resultados óptimos, debido a la flotabilidad que presentan los agregados seleccionados por sus bajas densidades. Durante el proceso experimental se variaron las proporciones de los materiales y se emplearon dos aditivos, uno incorporador de aire y otro, superplastificante. Éstos permitieron mejorar las condiciones de densidad y resistencia a la compresión de los hormigones.

Se realizaron ensayos del concreto en estado fresco tales como asentamiento, temperatura, densidad, contenido de aire y fabricación de especímenes cilíndricos dentro de los 15 minutos posteriores a la obtención de la muestra. El curado de los cilindros se llevó a cabo en dos etapas (una inicial bajo

### Abstract

The present investigation discloses, mainly, the characterization and properties of the selected light aggregates, in this case, expanded clay and pumice stone; likewise, it establishes a design method for its dosage under the application of corresponding ACI standards.

In the characterization of the light aggregates, specifically in the determination of the specific weight, several tests were carried out to obtain, as a recommendation, a stable procedure with optimal results, due to the buoyancy of the aggregates selected for their low densities.

During the experimental process the proportions of the materials were varied and two additives were used, one incorporating air and another, superplasticizer. These allowed to improve the conditions of density and resistance to compression of concrete.

Tests of fresh concrete such as settlement, temperature, density, air content and manufacture of cylindrical specimens were made within 15 minutes after obtaining the sample. The curing of the cylinders was carried out in two stages (one initial under normal conditions and one final with controlled alkaline pH.)

---

<sup>1</sup> Estudiante Carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana Quito, Sede Quito – Ecuador, Autor para correspondencia ✉: [kcarrera@est.ups.edu.ec](mailto:kcarrera@est.ups.edu.ec)

<sup>2</sup> Estudiante Carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana Quito, Sede Quito – Ecuador, Autor para correspondencia ✉: [schangoluisa@est.ups.edu.ec](mailto:schangoluisa@est.ups.edu.ec)

condiciones normales y una final con pH alcalino controlado.)

Además, se realizaron ensayos a compresión a edades de 1, 7 y 28 días, alcanzando a los 28 días resistencias de 22MPa, 21MPa y 39MPa para concretos conformados de arcilla, piedra pómez y ripio respectivamente. Finalmente, se comprobó, de manera cualitativa, la flotabilidad de algunos especímenes de hormigón ligero.

In addition, compression tests were carried out at ages of 1, 7 and 28 days, reaching resistance at 22 days, 22 MPa, 21 MPa and 39 MPa for shaped concretes of aricilla, pumice stone and gravel, respectively. Finally, the buoyancy of some lightweight concrete specimens was checked qualitatively.

**Palabras Clave:** Arcilla Expandida, Hormigón Ligero, Piedra Pómez, Resistencia, Flotabilidad.

**Keywords:** Expanded Clay, Light Concrete, Pumice Stone, Resistance, Buoyancy.

## **1. Introducción**

Desde hace varias décadas se ha visto el interés y la demanda de hormigones alternativos al ordinario, debido al alto impacto ambiental de su fabricación y a las normativas que buscan reducir su huella de carbono. Razón por la cual se han desarrollado diferentes hormigones verdes los cuales Liew et al. [1] hacen referencia al hormigón con alto volumen de ceniza volante, hormigón de ultra alto desempeño, hormigón de ultra alta resistencia, hormigón de alta resistencia, hormigón de alto desempeño, hormigón geopolimérico y al hormigón ligero. El presente artículo se enfoca en este último tipo de hormigón.

La institución The Concrete Society (en Reino Unido) define al hormigón ligero como “el hormigón que presenta una densidad seca al horno que no excede los 2000 kg/m<sup>3</sup> pero puede ser tan baja como 800 kg/m<sup>3</sup> dependiendo de los materiales utilizados” (EN 206:2016), respecto a la resistencia a compresión puede variar entre 1 y 65 N/mm<sup>2</sup>. Por otra parte, el ACI Concrete Terminology publicado en 2013 define al hormigón ligero como “hormigón con sustancial menor densidad que la presentada por el hormigón realizado con agregados de densidad normal; puede contener únicamente agregado ligero o bien, una combinación de agregado ligero con agregado de densidad normal; sus densidades de equilibrio, normalmente, oscilan entre las 70 y 120 lb/ft<sup>3</sup> (1120 y 1920 kg/m<sup>3</sup>).” Además la norma ACI 211.2-98 determina que el concreto con agregado ligero es aquel que presenta las siguientes características: “(a) se fabrica con agregados ligeros que cumplen con la ASTM C 330, (b) su resistencia a compresión excede las 2500 psi (180 kg/cm<sup>2</sup>) a la edad de 28 días al realizarse esta medición según la metodología de la

norma ASTM C 330 y (c) tiene una densidad seca al aire que no excede las 115 lb/ft<sup>3</sup>(1842 kg/m<sup>3</sup>), según lo estipulado en la norma ASTM C 567”.

Uno de los agregados ligeros más comúnmente utilizados para fabricar este tipo de hormigones es la arcilla expandida. Schmidt [2] explicó de manera muy detallada el proceso de expansión de los granúlos de este material, expuso que, previa molienda necesaria, se emplean distintos hornos en función de las características de la materia prima. El método más conocido para la producción de este material es el LECA, que emplea un horno rotatorio subdividido en una zona de conformación y secado, y otra zona de cocción. Las temperaturas de trabajo en la alimentación del horno rondan los 400°C para posteriormente, llegar a los 1150°C en el otro extremo del horno. Mientras el material avanza desde la zona de alimentación hacia la zona de altas temperaturas, la granulación, secado y expansión ocurren gracias a la rotación del horno.

Rashad [3] realizó una revisión de alrededor de 30 artículos que utilizaban arcilla expandida agregado ligero (LECA por sus siglas en inglés) ya sea como agregado fino, agregado grueso o ambos, a continuación se enlistan los beneficios de su uso: “modificación de la trabajabilidad, adecuada resistencia a la segregación, disminución la densidad, reducción de la fluidez, disminución la conductividad térmica (lo que conlleva a un buen aislamiento térmico), absorción del ruido (lo que le convierte en un buen aislante de sonido), incremento de la resistencia al fuego, aumento de la resistencia al ácido clorhídrico y al ácido láctico, disminución de la tendencia a la aparición de grietas y disminución del efecto de contracción”. De igual manera, enlista las desventajas en el

uso de LECA: “reducción de la resistencia mecánica, reducción de la resistencia a los ciclos de hielo/deshielo, reducción de la resistencia frente al ácido sulfúrico y aumento de la penetración por cloruros y absorción de agua”.

En una investigación basada en encuestas y cuestionarios para constructores (más de 6 mil) en diferentes estados de EUA, Mousa et al. [4] concluyeron que las razones para preferir el uso del hormigón de peso normal (HPN) frente al hormigón ligero (HL) se deben al bajo nivel de conocimiento respecto a las propiedades de este último hormigón, así como a algunos mitos técnicos. Consideran que el uso del HPN en Estados Unidos como material principal de construcción “no es económico, no es sustentable y muchas veces, ni siquiera es justificable”. Por ello, han propuesto la utilización del modelo Kotter para cambiar los paradigmas de la cultura de la construcción, mediante una coalición de los diferentes actores en la construcción (certificadores en construcción verde y sustentable, instituciones gubernamentales, usuarios finales, ingenieros estructurales, arquitectos, contratistas, proveedores, entre otros).

En el Ecuador, poco se ha investigado de manera formal respecto a los hormigones ligeros. En seguida se resumen algunos de los trabajos que se han encontrado al respecto. Valdez y Suárez [5] trabajaron hormigones ligeros variando agregados como piedra pómez, ceniza de cascarilla de arroz y poliestireno expandido y consiguieron densidades que oscilan entre los 1995 y 1883 kg/m<sup>3</sup>. Por su parte, Cañarte [6] estudió la resistencia a compresión de hormigones livianos empleando piedra pómez de región de Latacunga como agregado, reporta haber alcanzado una densidad promedio de 1809 kg/m<sup>3</sup> y resistencia de 252 kg/cm<sup>2</sup>. Gallegos [7] realizó hormigón alivianado también

usando piedra pómez de Latacunga, reporta un valor de peso volumétrico promedio de 2000 kg/m<sup>3</sup> y una resistencia compresión de 87 kg/cm<sup>2</sup>.

Tomando como base los antecedentes realizados en la región, el presente artículo tiene por objetivo dar a conocer el diseño de mezclas de hormigón ligero empleando piedra pómez y arcilla expandida del Ecuador.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Materiales

Los agregados ordinarios, fueron procedentes de la cantera Pintag, ubicada a 27.5 km al Suroeste de Quito en la Provincia de Pichincha, sector caracterizado por la explotación de materiales pétreos.

La piedra pómez se obtuvo de las canteras ubicadas en el sector de Lasso, cantón Latacunga, capital de la provincia de Cotopaxi, este material es conocido principalmente por uso en bloques alivianados que no cuentan con buenas propiedades mecánicas, pero sí con peso bajo.

La arcilla expandida se obtuvo por medio de un negocio local ubicado en el cantón Quito provincia de Pichincha en el Norte de la ciudad en el sector la Floresta; la presentación del producto conocido con el nombre de Arlita HydroKorrels es de 40lt, utilizada principalmente en el país de manera ornamental en el cuidado de plantaciones debido a sus propiedades absorbentes y de retención de humedad.

### 2.2. Metodología

#### 2.2.1. Revisión bibliográfica

Se recolectó la mayor cantidad de bibliografía existente sobre tesis, e investigaciones relacionadas; así como, métodos, procedimientos y normativas para los trabajos de investigación.



### 2.2.2. Ensayos de caracterización

Estos ensayos se realizaron según las normas siguientes detallados en la Tabla 1

Tabla 1: Ensayos de caracterización

Ensayo	Norma
Análisis granulométrico	NTE INEN 696 (ASTM C-136)
Peso específico y porcentaje de absorción	Ag. Fino: NTE INEN 856 (ASTM C-128) Ag Grueso: NTE INEN 857 (ASTM C-127)
Masa unitaria suelta y compactada	NTE INEN 858 (ASTM C-29)
Porcentaje de abrasión	NTE INEN 860 (ASTM C-131)
Contenido de humedad	NTE INEN 862 (ASTM -566)
Densidad del cemento	NTE INEN 156 (ASTM -188)
Peso específico agregado ligero	ACI 211.2-98
Factor de gravedad específico	ACI 211.2-98

### 2.2.3. Ensayos de caracterización agregados ligeros

#### 1) Peso específico

Se tomó como referencia la norma ACI 211.2-98, Apéndice A; además, debido a que el ensayo requiere repeticiones de acuerdo con las normas NTE INEN-856 y NTE INEN-857, se elaboró, a manera de recomendación, un procedimiento para determinar la densidad el cual damos a conocer a continuación:

Las muestras a ser ensayadas de pómez y arcilla fueron sumergidas previamente durante 24 horas, con ayuda de una malla para que fuera posible ejercer una presión sobre todo el material y se mantuviera completamente sumergido.

Se procedió a extraer las muestras para, posteriormente, dejarlas en estado de superficie seca saturada (SSS). Teniendo la

precaución de que el tiempo de secado fuera el mismo entre cada muestra para que los resultados quedaran dentro del rango de 20 kg/m<sup>3</sup> especificado en la norma ASTM C128.

De acuerdo con la norma ACI 211.2-98 se utilizó un picnómetro de un volumen conocido, el cual se calibró según la norma ASTM C128, registrando los datos del peso del picnómetro seco y vacío; y posteriormente, se llenó con agua y se eliminó el aire atrapado con ayuda de un vidrio como enrasador.

Se colocó el árido ligero dentro del picnómetro, ocupando la mitad de su capacidad para posteriormente llenarlo de agua a una temperatura controlada de 23±2 °C, con ayuda de una bomba de vacíos se extrajo el aire atrapado, siguiendo un proceso de rodado y sacudiendo el frasco. Este procedimiento se controló de igual manera manteniendo un tiempo de 15min en la extracción del aire.

Finalmente, se tomaron los pesos correspondientes al frasco lleno completamente con agua y con el material ligero en su interior una vez enrasado con el vidrio.

#### 2) Contenido de humedad

Para los agregados tradicionales el ensayo se llevó acabo de acuerdo con las normas NTE INEN 862 y ASTM C566, en cuanto a los agregados livianos como son la arcilla y la pómez, se procedió a saturarlos durante un periodo de 24 horas para posteriormente dejarlos en estado SSS y determinar su contenido de humedad de la forma ordinaria.

#### 3) Factor de gravedad específico

Se determinó a partir de la norma ACI 211.2-98, Apéndice A. el mismo que se indica a continuación:

Se tomaron dos muestras representativas de cada agregado liviano a analizar. La primera muestra se determinó

el contenido de humedad del agregado. La segunda muestra se colocó en el picnómetro vacío y se agregó agua hasta que el frasco esté lleno hasta la mitad. El tiempo de adición de agua debe ser notado.

El aire atrapado entre las partículas de agregado se eliminó rodando y sacudiendo el recipiente. Durante la agitación, el orificio en la parte superior del picnómetro se cubrió con el dedo del operador. El tarro se llena y agita nuevamente para eliminar cualquier aire adicional atrapado. El nivel de agua en el picnómetro debe ajustarse a su capacidad máxima y las superficies exteriores del recipiente deben secarse antes de pesar.

El picnómetro, así llenado con la muestra y el agua, se pesó después de 5, 10 y 30 minutos de inmersión en la muestra para obtener datos completos, y los pesos en estos momentos se registran después de cada relleno.

4) Densidad del hormigón en estado fresco  
Previamente a la realización del ensayo bajo la aplicación de norma ASTM C138 se seleccionó el método de compactación por varillado debido a que el revenimiento del concreto superó los 75mm. Finalizada la consolidación, se enrasó la parte superior de la superficie de hormigón, dejando el recipiente lleno justamente a nivel. Se limpió el exterior del recipiente de cualquier exceso de concreto existente y se pesó la masa del recipiente de ensayo llenado con hormigón

5) Contenido de aire

La determinación del contenido de aire del concreto recién mezclado se realizó inicialmente según el “Método Volumétrico” bajo la norma ASTM C173 el mismo que, fue descartado debido a que las partículas del agregado ligero comenzaron a flotar e interferir en la correcta ejecución del ensayo. Razón por la cual se procedió a aplicar el Método por Presión usando un medidor tipo B, bajo la aplicación de la

Norma ASTM C231 realizando previamente el tamizado por vía húmeda a través del tamiz N°4 y determinando el contenido de aire de la fracción del mortero.

#### *2.2.4. Diseño teórico de los hormigones ordinarios y ligeros, según normas.*

-Hormigón ordinario ACI 211.1-91 [8]

-Hormigón ligero ACI 211.2-98 [9]

-Ajustes del diseño teórico

#### *2.2.5. Ensayos de hormigón en estado fresco, elaboración y curado de los cilindros de hormigón ordinarios y ligeros, según las normas:*

-Densidad del hormigón ASTM

-C138 Temperatura del hormigón ASTM C1064

-Contenido de aire, método por presión ASTM C231

-Asentamiento del hormigón ASTM C143

-Curado de Especímenes NTE INEN 3124

-Fabricación de especímenes cilíndricos ASTM C31

### **3. Resultados y Discusión**

#### **3.1. Análisis granulométrico**

Para el análisis granulométrico del agregado grueso correspondiente a la arcilla se obtuvo un tamaño máximo nominal de 1/2” y un tamaño máximo de 3/4” con un porcentaje de validez de 0.21%, cumpliendo de esta manera con el porcentaje máximo permisible de 0.3% según la norma INEN 696 para la aceptación de los resultados obtenidos del ensayo. En cuanto a la piedra pómez, se obtuvo un tamaño máximo nominal de 3/4” y un tamaño máximo de 1” con un 0.09% como porcentaje de validez del ensayo (% Max=0.3%); de la misma manera, para el ripio procedente de la mina de Pintag, se obtuvo un tamaño máximo nominal de 3/4” y un tamaño máximo de 1” con un 0.069%

como porcentaje de validez del ensayo. (% Max=0.3%).

### 3.2. Peso específico

Los resultados obtenidos de los ensayos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados del ensayo de peso específico

Tipo agregado	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )
Ripio Pintag	2404
Arena Pintag	2475
Arcilla expandida	688
Piedra pómez	1196

Por datos del fabricante, la arcilla expandida Arlita; presenta una densidad que puede variar alrededor de 300 kg/m<sup>3</sup> hasta 700 kg/m<sup>3</sup>, obteniéndose en la experimentación un valor de 688 kg/m<sup>3</sup>. Por otro lado, la pómez presentó una densidad de 1196 kg/m<sup>3</sup> la misma que fue comparable a los resultados obtenidos en la investigación de Carlos Videla C. y Mauricio López C; presentando en su estudio valores alrededor de 1228 kg/m<sup>3</sup> hasta 1245 kg/m<sup>3</sup>. Además, se realizaron dos muestras para cada tipo de agregado cumpliendo con la norma INEN 857, consiguiendo una precisión y desviación aceptable entre dos resultados de 20 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3. Capacidad de Absorción

Los resultados fueron obtenidos después de haberse realizado dos muestras por agregado y cumpliendo con el rango aceptable entre resultados de 0.31% dado por la norma NTE INEN 857. Estos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultados del ensayo de capacidad de absorción

Tipo agregado	Absorción (%)
Ripio Pintag	2.8
Arena Pintag	3.3
Arcilla expandida	14.3
Piedra pómez	51.6

Los valores obtenidos para la arcilla expandida y pómez son comparables con los obtenidos por Carlos Videla C. y Mauricio López C en su investigación; la cual presenta un valor del 17% para la arcilla expandida Leca y nos menciona que para la pómez puede oscilar en un rango del 40% al 85%.

### 3.4. Abrasión

El ensayo se realizó bajo la norma NTE INEN 860, los resultados se muestran en la Tabla 4

Tabla 4: Resultados del ensayo de abrasión

Tipo agregado	Abrasión (%)
Ripio Pintag	25
Arcilla expandida	43
Piedra pómez	50

Los agregados utilizados mostraron una resistente al desgaste que no excede el 50% establecido en la NORMA INEN 872. Por lo cual son aptos para el diseño de las mezclas.

### 3.5. Masa unitaria suelta y compactada

El ensayo se realizó por lo menos 5 veces hasta obtener resultados congruentes entre sí; todo esto determinado según la norma NTE INEN 858. Los resultados se presentan en la Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5: Resultados del ensayo masa unitaria suelta

Tipo agregado	Densidad suelta (g/cm <sup>3</sup> )
Ripio Pintag	1.20
Arena Pintag	1.39
Arcilla expandida	0.32
Piedra pómez	0.36

Tabla 6: Resultados del ensayo masa unitaria compactada

Tipo agregado	Densidad compactada (g/cm <sup>3</sup> )
Ripio Pintag	1.30
Arena Pintag	1.55

Tipo agregado	Densidad compactada (g/cm <sup>3</sup> )
Arcilla expandida	0.33
Piedra pómez	0.38

Los resultados de densidad compactada en cuanto a la arcilla expandida y pómez son comparables con los obtenidos por Carlos Videla C. y Mauricio López C en su investigación; donde se menciona que la arcilla expandida Leca presenta un valor 0.64 g/cm<sup>3</sup>, y para la pómez, valores dentro del rango de 0.31 g/cm<sup>3</sup> hasta 0.56g/cm<sup>3</sup>.

### 3.6. Contenido de humedad

El ensayo se llevó a cabo de acuerdo con las normas NTE INEN 862 y ASTM C566 para los agregados tradicionales procedentes de Pintag, en cuanto a los agregados livianos como son la arcilla y la pómez, se procedió a realizar ensayos de prueba con base en la metodología, para determinar la variación en el tiempo del contenido de humedad y poder controlar el mismo en el momento de elaborar las mezclas de hormigón. Los resultados al momento de elaborar las mezclas de los diferentes hormigones se presentan en la Tabla 7 y Tabla 8.

Tabla 7: Resultados del contenido de humedad en agregados para hormigón ordinario

Tipo agregado	Humedad (%)	Absorción (%)
Ripio Pintag	0.04	2.8
Arena Pintag	1.4	3.3

Tabla 8: Resultados del contenido de humedad en agregados para hormigón ligero

Tipo agregado	Humedad (%)	Absorción (%)
Arena Pintag	2.0	2.8
Arcilla expandida	14.2	14.3
Piedra pómez	50.5	51.6

Al momento de realizar las mezclas, la corrección por humedad comúnmente es necesaria, aunque se tenga especial cuidado

en la manera de acopio, y protección de los agregados ante las condiciones climáticas; por ello se observa una gran diferencia en los valores de humedad (0.04%) y absorción (2.8%) de los agregados utilizados en la elaboración de la mezcla del hormigón normal. Pero, al contrario, en los agregados para la mezcla del hormigón ligero se evidencia valores relativamente parecidos; de manera que se obtuvo un contenido de humedad de la arcilla de 14,15% cercano al porcentaje de absorción (14.31%) y un contenido de humedad de la piedra pómez de 50,47% cercano a su porcentaje de absorción (51.62%) por lo que el ajuste por humedad por parte del agregado grueso ligero fue mínimo en la ejecución de las mezclas.

### 3.7. Densidad del cemento

El cemento que se utilizó para la elaboración del ensayo y futuras mezclas fue el Cemento Chimborazo Tipo HE de grado industrial, los resultados del ensayo se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Resultados del ensayo densidad del cemento

Marca	Tipo	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Cemento Chimborazo	HE	2.97

Este resultado se obtuvo de acuerdo a la norma NTE INEN 156 y ASTM C188, por el método del frasco de Lechatelier, teniendo en cuenta las recomendaciones dadas respecto a la densidad del líquido utilizado que debe ser de 0.73g/cm<sup>3</sup>; además, de controlar la temperatura y humedad relativa de la habitación en un rango de 23±2°C y 60%.

### 3.8. Factor de gravedad específica

El factor de gravedad específica (S) del picnómetro, después de cualquier tiempo de

inmersión particular, se calcula mediante la ecuación 1.

$$S = \frac{C}{C + B - A} \quad (1)$$

Dónde:

A = peso del picnómetro cargado con agregado y luego lleno con agua, g

B = peso del picnómetro lleno de agua, g

C = peso del agregado probado, húmedo o seco, g

Los resultados de los ensayos se presentan a continuación en la Tabla 10.

Tabla 10: Resultados del ensayo factor de gravedad específica

Tipo agregado	Factor S
Arcilla expandida	0.69
Piedra pómez	1.17

### 3.9. Dosificación del Hormigón Ligeró

El diseño del hormigón ligero se realizó en base a la norma ACI 211.2-98, específicamente por el “Método por Peso”, teniendo como información preliminar, los resultados de ensayo anteriormente establecidos. Dicha mezcla previa tuvo como parámetros iniciales una resistencia de 21 MPa, un asentamiento entre 2.5 a 10 cm y una relación agua/ cemento de 0.45. Con ello se realizó una mezcla de prueba (como también lo solicita la norma) para, posteriormente, realizarle ajustes.

Una variante que influye de manera significativa en el diseño del hormigón ligero respecto al diseño de un hormigón ordinario es el factor de gravedad específica del agregado ligero conjuntamente con el aire atrapado del hormigón. Con ello se obtuvo una estimación del peso del hormigón fresco con el 7,5% de aire atrapado para proceder a calcular la cantidad de finos requeridos en la mezcla. Cabe recalcar que el factor de gravedad

específico de la arcilla no ingresó dentro de los rangos establecidos por la tabla 3.2.2.3 de la norma ACI 211.2-98, por lo que se realizó una extrapolación lineal entre el peso de hormigón fresco y los factores de gravedad específicos establecidos en dicha norma.

De tal manera que en la tabla 11, se indican las cantidades originales obtenidas para fabricar 1m<sup>3</sup> de hormigón al peso.

Tabla 111: Cantidades originales para fabricar 1m<sup>3</sup> de hormigón al peso

MATERIAL	Mezcla con Arcilla	PIEDRA PÓMEZ
<b>Cemento (Kg)</b>	428.48	428.48
<b>Arena AF (SSD)</b>	547.65	612.55
<b>Agregado Grueso AG (SSD)</b>	233.10	382.34
<b>Agua netamente de mezclado</b>	192.82	195.81
<b>Total</b>	1402.04	1616.18

El ajuste por adición de agua se realizó considerando la humedad libre y la humedad proporcionada por el agregado, por lo tanto, el agua que se añadió al lote fue de 199.95 kg y 203.22 kg para 1m<sup>3</sup> de hormigón para la amasada conformada de arcilla y piedra pómez respectivamente.

Al dejar el material en estado SSS luego de haber sido sumergido por 24 horas se obtuvo un contenido de humedad de la arcilla de 14,15% cercano al porcentaje de absorción (14.31%) y un contenido de humedad de la pómez de 50,47% cercano a su porcentaje de absorción (51.62%) por lo que el ajuste por humedad por parte del agregado grueso ligero fue mínimo.

El volumen de la amasada requerido para la ejecución de los ensayos en el concreto fresco se determinó en función al volumen de un cilindro de 100 x 200 mm (diámetro y altura respectivamente) efectuando la mezcla para 22 cilindros; por lo tanto el volumen de los 22 cilindros se

distribuyó para utilizar el volumen de 15 cilindros en la fabricación de especímenes de concreto, el volumen de 4 cilindros para realizar el ensayo del contenido de aire por el método a presión tomando en cuenta el tamizado en húmedo que el mismo requiere y el volumen de 3 cilindros para realizar el ensayo de densidad del hormigón en estado fresco.

Con ello, en las tablas 12 y 13 se muestran los diseños finales empleados para 1m<sup>3</sup> de hormigón por peso.

Tabla 12: Cantidades para el hormigón al peso de la mezcla con arcilla

Material	Cantidad en peso para 1 m3	Cantidad un saco de cemento	Dosificación
	kg	Kg	
Agua	169.9	6.35	0.40
Cemento	428.5	16.03	1
Area	540.9	20.23	1.26
Arcilla	232.8	8.71	0.54
Aer Rmc	0.43	0.016	0.001
Viscocrete	0.86	0.048	0.002

Tabla 13: Cantidades para el hormigón al Peso de la mezcla con piedra pómez

Material	Cantidad en peso para 1 m3	Cantidad un saco de cemento	Dosificación
	kg	Kg	
Agua	173.2	6.48	0.40
Cemento	428.5	16.03	1.00
Area	605.1	22.63	1.41
P.Pómez	379.4	14.19	0.89
Aer Rmc	0.43	0.016	0.001
Viscocrete	1.28	0.048	0.003

Para las mezclas finales, se utilizaron dos aditivos de la casa Sika, el aditivo AerRmc como incorporador de aire para promover la ligereza del hormigón y el aditivo Viscocrete como superplastificante, con el fin de reducir la cantidad de agua de

la mezcla y aumentar la resistencia del hormigón ligero.

Iniciadas las mezclas, previamente a la adición de los aditivos, se controló un asentamiento inicial de 2mm, disminuyendo 1.28 Lt de agua, se colocó el incorporador de aire AER RMC al 0.1% del contenido de cemento, esperando un tiempo de 3 minutos se procedió a colocar el superplastificante Viscocrete al 0,2%; 0,3% del contenido de cemento obteniendo finalmente un hormigón plástico y consistente con un asentamiento final de 110 mm y 112mm para las mezclas conformadas de arcilla y piedra pómez respectivamente.

### 3.10. Dosificación del Hormigón Ordinario

Realizada la caracterización de los agregados, se diseñó el hormigón convencional para una resistencia de 21 MPa, mediante aplicación del método del ACI 211.1 utilizando como referencia la Tecnología del Concreto, Tomo1. El diseño se efectuó con relación agua/cemento de 0,44 con un asentamiento entre 50mm y 100mm.

Iniciada la mezcla conformada de agregado grueso ordinario, antes de adicionar los aditivos, se controló un asentamiento inicial de 5 mm, disminuyendo 0.52 Lt de agua en la mezcla. Se colocó el incorporador de aire AER RMC al 0.1% del contenido de cemento, esperando un tiempo de 3 minutos se procedió a colocar el superplastificante Viscocrete al 0,3% del contenido de cemento obteniendo finalmente un hormigón plástico y consistente con un asentamiento de 100mm. Los resultados de los ensayos se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14: Cantidades para el hormigón al peso de la mezcla con ripio

Material	Cantidad en peso para 1 m3	Cantidad un saco de cemento	Dosificación
	kg	kg	
Agua	165.58	6.19	0.39
Cemento	428.48	16.03	1.00
Area	540.94	20.23	1.26
Ripio	232.77	8.71	0.54
Aer Rmc	0.43	0.016	0.001
Viscocrete	1.25	0.048	0.003

### 3.11. Ensayos del Hormigón en Estado Fresco

#### 3.11.1. Ensayo de Asentamiento

En la tabla 15 se presentan los asentamientos obtenidos siguiendo el proceso de la norma ASTM C143, ensayo mediante el cual se controló la consistencia del hormigón en estado plástico, y se observó que el asentamiento aumenta proporcionalmente con el contenido de agua en la mezcla y es inversamente proporcional a la resistencia del hormigón

Tabla 15: Resultados del ensayo de asentamiento

AGREGADO	ASENTAMIENTO
	mm
Arcilla	110
P.Pómez	120
Ripio	100



Figura 1. Asentamiento inicial sin aditivos (a), asentamiento final con aditivos (b)

#### 3.11.2. Ensayo de Temperatura

Este ensayo se ejecutó según la norma ASTM C 1064 mediante la utilización de un termómetro como dispositivo de medición de temperatura colocado dentro de la amasada descargada en una carretilla previamente humedecida de 70 kg de capacidad de carga. El concreto cubrió el sensor de temperatura 75mm en todas sus direcciones registrando las temperaturas en estado fresco como se muestra en la tabla 16 dentro de los 5 minutos posteriores de la obtención de la muestra de concreto, cumpliendo con los rangos de tiempo estipulados en la norma ASTM C1064.

Tabla 16: Resultados del ensayo de temperatura

AGREGADO	DENSIDAD
	°C
Arcilla	25
P.Pómez	23
Ripio	18



Figura 1. Ensayo de temperatura

#### 3.11.3. Ensayo de Densidad

En la tabla 17 se muestran los resultados obtenidos de la densidad en estado fresco donde se observa que el hormigón más denso es el ordinario conformado por ripio de pintag y el más ligero el hormigón conformado por arcilla.

Tabla 17: Resultados del ensayo de densidad

AGREGADO	DENSIDAD
	kg/m <sup>3</sup>
Arcilla	1402
P.Pómez	1500
Ripio	2058

### 3.11.4. Ensayo de Contenido de Aire

En la tabla 18 se muestran los resultados obtenidos del contenido de aire

Tabla 18: Resultados del ensayo de contenido de aire

AGREGADO	Contenido de Aire
	%
Arcilla	14
P.Pómez	16
Ripio	14



Figura 3. Contenido de aire método por presión

### 3.12. Resultados de Resistencia a Compresión

En la tabla 19 se observa que el hormigón ordinario a los 28 días presenta una resistencia a la compresión y densidad mayores a las obtenidas con los hormigones ligeros, pero, a su vez, se aprecia que éstos últimos generan concretos con resistencias a la compresión estructurales de 21 y 22MPa con densidades muy bajas, de modo que en construcciones de concreto a nivel de proyecto, se reduciría el peso propio de la estructura y el tamaño de los distintos elementos estructurales, llegando a los cimientos y al suelo con menores cargas.

Sin embargo, para comprobar esta información y proyectar su uso en obras, se recomienda hacer ensayos más exhaustivos de las propiedades mecánicas de estos hormigones como: módulos de elasticidad, resistencia a compresión a edades superiores, ensayos de durabilidad que pudieran incluir expansión, reacciones álcali-agregado, resistencia a sulfatos, entre otros, que hagan segura la utilización de estos concretos.

Tabla 19: Resultados resistencias a compresión

	ARCILLA	PIEDRA PÓMEZ	RIPIO
<b>1 Día</b>			
F'c (MPa)	8.74	8.24	9.14
P (kg/m <sup>3</sup> )	1371	1484	2042
<b>7 Días</b>			
F'c (MPa)	17.00	15.90	29.13
P (kg/m <sup>3</sup> )	1370	1482	2040
<b>28 Días</b>			
F'c (MPa)	22.44	21.04	39.39
P (kg/m <sup>3</sup> )	1369	1482	2040

### 3.13. Condiciones de curado

El proceso se llevó a cabo según la norma NTE INEN 3124. El curado inicial se efectuó a una temperatura de 21°C en el cual los especímenes de hormigón permanecieron en el molde cilíndrico por un periodo de 24 horas.

Para el curado final, se procedió al llenado y control del pH del agua con el uso de cal para cumplir con el valor de 12 para pH estipulado por norma; de igual manera se calentó el agua para cumplir con la temperatura de 23±2°C.

Finalmente se desmoldaron los cilindros respetando el tiempo estipulado de 20±4 horas a partir de su fabricación. De igual manera se controló la temperatura



diariamente en las tardes dejando el agua de las piscinas a 25°C.



Figura 4. Preparación piscinas (a), Control de pH (b)

### 3.14. Ensayos de flotabilidad

En la investigación se planteó realizar ensayos de flotabilidad teniendo como objetivo comprobar las propiedades del hormigón para un uso de manera artesanal en la elaboración de elementos de concreto que requieran esta característica, se tomó como referencia una canoa. Por este motivo se intentó realizar un espécimen de hormigón en forma de cilindro hueco siguiendo las recomendaciones dadas por la norma NTE INEN 3124 para la fabricación y curado.

El espécimen fue llevado a un proceso de sellado en sus extremos para evitar el ingreso de líquido hacia el interior del elemento; de esta manera, sería posible determinar la densidad del mismo, al conocer los datos de la mezcla de hormigón con que se elaboró el espécimen. Así fue posible obtener como resultado un ensayo en el cual a escala se puedan comprobar, cualitativamente, las propiedades de flotabilidad del hormigón, sabiendo que éste presenta una densidad bajo los 1400kg/m<sup>3</sup> para la arcilla expandida y valores bajo los 1500 kg/m<sup>3</sup> para el hormigón elaborado con pómez.



Figura 5. Especimen cilíndrico sellado (a), Cilindro hueco (b)

## 3. Conclusiones

Método por Presión bajo la aplicación de la Norma ASTM C231.

Se obtuvo el diseño de dos diferentes hormigones ligeros, esto gracias a los pesos específicos bajos de los agregados y aditivos que contribuyeron significativamente a alivianar los hormigones, que conjuntamente lograron una densidad en relación de 1400 kg/m<sup>3</sup> a 1500 kg/m<sup>3</sup>

Manteniendo el mismo contenido de cemento entre el hormigón ligero y el hormigón convencional se concluyó que el ligero tuvo resistencias a los 28 días menores respecto a las del convencional siendo de 22MPa, 21MPa y de 39MPa para mezclas conformadas de arcilla, piedra pómez y ripio respectivamente, lo cual era un comportamiento esperado.

Los hormigones ligeros presentaron un avance en el desarrollo de las resistencias a la compresión ensayadas a las diferentes edades según lo esperado, pues los especímenes cilíndricos, al 1 día alcanzaron el 40% de su resistencia, a los 7 días el 75 % consiguiéndose a los 28 días su resistencia al 100%. Lo que es relacionable con un diseño adecuado y correctas condiciones de fabricación y curado.

La incorporación de aire en las mezclas interfirió negativamente en las resistencias; por esto se disminuyó la cantidad de agua en la amasada bajo un control de asentamiento inicial en relación de 0 a 10mm y, mediante la colocación del Viscocrete se llegó al asentamiento

esperado consiguiendo resistencias a la compresión a los 28 días en relación de 21MPa  $\pm$ 1 en los hormigones ligeros y en el hormigón convencional con ripio procedente de Pintag resistencias a los 28 días de 39MPa.

El uso del aditivo incorporador de aire AER RMC, bajo el peso del hormigón permitiendo obtener densidades bajas para cada tipo de mezcla, en pruebas realizadas con diferentes porcentajes en relación con el peso de cemento se encontró que al 0.1 por ciento el hormigón presento una adición del aire suficiente cuando se emplean áridos ligeros obteniendo un hormigón ligero con buenas propiedades mecánicas.

Del aditivo plastificante VISCOCRETE, se evidenció que éste tiene una acción altamente efectiva en pequeñas cantidades; por lo cual, al 0.2 y 0.3 % en relación al peso del cemento fue suficiente para lograr incrementos en el asentamiento final de las mezclas en relación de 120 $\pm$ 20 mm, que con la baja relación agua cemento se obtuvo un hormigón trabajable con buena resistencia a la compresión.

## Referencias

- [1] k. Liew, A. Sojobi y L. Zhang, "Green concrete: Prospects and challenges" *Constructions and Building Materials*, vol. 156, Detroit: American Concrete Institute, 2017, pp. 1963-1095.
- [2] H. Schmidt., "La Producción y utilización de gránulos de arcilla expandida en la literatura del ramo" *Die ZiegelIndustrie*, vol. 21, 1971, pp. 463-471.
- [3] A. Rashad., "Lightweight expanded clay aggregate as a building material - An overview" *Construction and Building Materials*, vol. 170, pp. 757-775.
- [4] M. M. y. M. A. Mousa, "Lightweight concrete in America: presence and challenge" *Sustainable Production and Consumption*, vol. 15, 2018, pp. 131-144.
- [5] Asocreto, *Tecnología del Concreto*, tercera ed. ed., Colombia, 2010.
- [6] ACI.Committee 211.1-91 (R2002), «Standard Practice for Selecting Properties for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete,» *Detroit: American Concrete Institute*, 1991.
- [7] ACI Committee 544.1R-96 (R-2002), Report on Fiber Reinforced Concrete, «Detroit: American Concrete Institute,» 1996.
- [8] ASTM International, C1116/C1116M-10a Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete, Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 1989.
- [9] C.V.C y M.L.C, Dosificación de Hormigones livianos, *Ingeniería de Construcción*, vol. 2, 2006, p. 15.
- [10] M. Uysal y H. Tanyildizi, «Estimation of compressive strength of self compacting concrete containing polpropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using artificial neural network,» *Construction and Building Materials*, vol. 27, pp. 404-414, 2012.