

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.

Elaborada por:

Juan Diego Correa Chaparro

Giuseppe Luigi Ratti Guzmán

Directores:

María Patricia León Neira

Germán Hermida

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ingeniería

Énfasis en estructuras

Bogotá, Colombia

7 de diciembre del 2015

## INTRODUCCIÓN

El uso de agregados ligeros no es una invención reciente en el ámbito ingenieril, su uso data desde alrededor del año 3000 a.C., con la construcción de la ciudad de Babilonia. Posteriormente, fueron los griegos y los romanos quienes hicieron uso de materiales como lo son la piedra pómez y la escoria, formados por la actividad volcánica, en la construcción de sus estructuras. En la actualidad, aún es posible encontrar algunas de estas estructuras creadas en concreto con base en esta clase de agregados de origen natural. Entre las más grandes y representativas están la Catedral de Santa Sofía, construida alrededor del año 4000 a.C., en Estambul (Turquía); el Panteón y el Coliseo Romano, construidos alrededor del año 100 d.C., en Roma (Italia). También se pueden encontrar rastros del uso de agregados naturales en América, durante el periodo Maya, con la construcción de las pirámides, en México.

Es lamentable que, a pesar de su uso en la antigüedad, sea hasta el año de 1824, con el desarrollo de un cemento denominado Portland, cuando haga la reaparición el concreto, como un material utilizado por excelencia en la construcción. Así mismo es hasta el año de 1845, en Alemania, donde se empiezan a producir los primeros bloques de mampostería en piedra pómez, cuando reaparece el uso de materiales ligeros de origen natural, para la construcción. Posteriormente, el uso de esta técnica se trasladó a Islandia donde, a partir de 1928, la piedra pómez se empezó a usar en las construcciones locales.

Con la demanda creciente del uso del concreto en el mundo y en vista de la escasez de recursos naturales para su uso como agregados ligeros, se fue igualmente creando nuevas tecnologías, avances y mejoras del producto con diferentes fines y aplicaciones, donde se

evidenció cada vez más la necesidad de concretos ligeros pero a la vez resistentes, que permitieran la disminución global de costos, pero garantizaran la adecuada seguridad.

Fue así como en el año de 1918, Stephen J. Hayde, en Estados Unidos, logró desarrollar un proceso industrial, por medio de hornos rotatorios a alta temperatura, para crear los primeros agregados ligeros con base en arcillas expansivas, la cual llamaría “Haydite”.

Posterior a la segunda guerra mundial, a mediados de 1950 y 1960, esta técnica de concretos ligeros mediante el uso de arcillas expansivas, fue adoptada por varias construcciones en Estados Unidos y Europa donde en Dinamarca en el año de 1939 se abrió la primera fábrica.

Es por esto que, desde hace ya varias décadas, el concreto ligero estructural se ha empleado en otros países de forma exitosa y a su vez ha mostrado las múltiples ventajas que tiene con respecto al concreto convencional. Algunas de estas ventajas hacen que esta tecnología sea una alternativa llamativa como material de construcción en el sector industrial.

En sudamericana, actualmente solo Argentina y Venezuela cuentan con plantas abiertas de producción de agregados ligeros con base en arcillas expansivas. En Brasil se han presentado grandes avances investigativos y en Colombia fue hasta el año 2010, con la actualización de la Norma Sismo Resistente Colombiana, que se reglamentó y se permitió el uso de concretos estructurales ligeros, con la idea de desarrollar la investigación en este campo en el país. Esta nueva reglamentación, fue exitosa ya que en el año 2015, Colombia empezará a contar con plantas abiertas de producción de agregados ligeros con base en arcillas expansivas.

La realización de esta investigación se elabora con la intención de suplir la deficiencia que ha existido en materia investigativa en este país, relacionada con la producción de Concretos ligeros Estructurales, por lo que se pretende realizar la fabricación de un Concreto ligero

Estructural con el agregado con base en arcillas expandidas. Además se aspira lograr aumentar el conocimiento y comprensión de los beneficios que conlleva la elaboración de un Concreto Ligero Estructural en el sector industrial, aportando con este estudio más información sobre cuáles serían las condiciones aptas para su producción y utilización en el país, especialmente para su uso en Bogotá D.C.

# ÍNDICE

1. JUSTIFICACIÓN.....	9
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	12
3. CONCRETO LIGERO ESTRUCTURAL.....	13
3.1 Tipos de agregados ligeros. ....	15
3.1.1 Agregados ligeros de origen natural.....	15
3.1.2 Agregados ligeros manufacturados. ....	16
3.2 Propiedades en estado fresco del concreto.....	18
3.2.1 Manejabilidad. ....	18
3.2.2 Exudación del concreto. ....	19
3.3 Propiedades en estado endurecido del concreto ligero .....	19
3.3.1 Densidad del concreto ligero.....	19
3.3.2 Resistencia a la compresión.....	22
3.3.3 Módulo de elasticidad del concreto.....	27
3.3.4 Permeabilidad.....	28
4. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	30
4.1 Caracterización de la AET.....	30
4.2 Diseño de mezcla.....	31

4.3	Diseño experimental concretos ligeros con AET .....	33
4.3.1	Materiales. ....	33
4.3.2	Procedimiento.....	34
5.	MODELOS NUMERICOS.....	37
5.1	Peso muerto de la estructura. ....	38
5.2	Análisis de derivas. ....	40
5.3	Análisis Pushover. ....	41
5.4	Fuerzas y deflexiones.....	41
5.5	Cortante basal. ....	42
6.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	44
6.1	Costo del concreto ligero. ....	44
6.2	Costos en la estructura en concreto.....	45
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
7.1	Caracterización de la arcilla expandida térmicamente, proveniente del valle del Aburra. ....	47
7.1.1	Granulometría (NTC 4045, NTC 77 y NTC 78). ....	47
7.1.2	Masa unitaria (NTC 92, 1995).....	50
7.1.3	Densidad y absorción para el componente grueso. (NTC 176, 1995).....	51
7.1.4	Caracterización de la arcilla expandida térmicamente. ....	53

7.2	Determinar las propiedades físicas y mecánicas del concreto estructural aligerado	54
7.2.1	Densidad en estado fresco y densidad en estado endurecido .....	55
7.2.2	Módulo de elasticidad.....	64
7.2.3	Permeabilidad. (NTC 4483) .....	69
7.2.4	Características del concreto ligero estructural.....	74
7.3	Identificación de los beneficios del uso de concretos ligeros en una estructura Aporticada.....	76
7.3.1	Análisis del peso muerto de la estructura. ....	77
7.3.2	Análisis variación de la deriva.....	77
7.3.3	Análisis PUSHOVER.....	79
7.3.4	Fuerzas y deflexiones. ....	81
7.3.5	Cortante Basal. ....	84
7.3.6	Beneficios del uso de concretos ligeros estructurales en una estructura aporticada. ....	86
7.4	Análisis costo beneficio. ....	88
7.4.1	Costo del concreto. ....	88
7.4.2	Costos en la estructura en concreto. ....	91
8.	CONCLUSIONES. ....	93
8.1	Propiedades físicas analizadas de la Arcilla expandida Térmicamente nacional. .	93

8.2	Concreto ligero estructural.....	93
8.3	Identificación de los beneficios del uso de concretos ligeros en una estructura aporticada.....	94
9.	RECOMENDACIONES.....	96
9.1	En cuanto a la AET.....	96
9.2	En cuanto a concretos ligeros hechos con AET.....	96
9.3	En cuanto la modelación estructural con concreto ligeros: .....	97
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	98

## **1. JUSTIFICACIÓN**

En la etapa de diseño de cualquier estructura es imperativo realizar el análisis de cargas de la misma, para poder determinar los esfuerzos a las que estará expuesta y así mismo definir propiedades como materiales, secciones, luces y refuerzos. Dentro del análisis de cargas que se le realizan a las estructuras se encuentran las cargas muertas, definidas como todas aquellas cargas propias de la estructura del edificio y que representan un esfuerzo a la misma (peso propio). Partiendo de lo anterior se puede concluir que a menor peso de la estructura menor esfuerzo y por ende menores secciones en elementos estructurales como vigas y columnas representando así un ahorro en materiales y estructuras más competitivas. (Norma Sismo Resistente, 2010).

El hecho de reducir el peso propio de las estructuras no se puede limitar tan solo a conseguir menores secciones y ahorro de materiales, por otro lado es importante analizar que esta reducción del peso conlleva a una menor fuerza sísmica o cortante basal, debido a que la masa de la estructura es directamente proporcional a esta, que se experimenta en el caso de un sismo. Es por esto que la necesidad de crear estructuras más livianas se hace más evidente frente a la seguridad de los usuarios de nuestros diseños y estructuras. (Norma Sismo Resistente, 2010).

Una manera de reducir el peso propio de las estructuras es atacar directamente los materiales de los cuales están compuestas, es aquí donde encontramos que la mayoría de estructuras convencionales están constituidas por concreto estructural el cual tiene una densidad promedio de  $2400 \text{ kg/m}^3$  que se distribuyen entre la arena, los agregados gruesos (grava), el cemento, el agua y los aditivos. (Norma Sismo Resistente, 2010).

La metodología planteada para desarrollar concretos más livianos y por ende estructuras más livianas, es reemplazar total o parcialmente las gravas por elementos que ofrezcan propiedades mecánicas similares pero que a su vez brinden a la mezcla de concreto una menor densidad. Es en ese punto donde podemos hablar de concretos y agregados aligerados.

Es un hecho que en las últimas décadas, la gravedad específica del concreto se redujo eficientemente gracias al uso de los agregados ligeros. El concreto ligero es obtenido usando agregados porosos con baja densidad en vez de los agregados convencionales, se podría decir que el concreto aligerado consiste en un concreto al cual básicamente se le sustituyó el agregado convencional, en su totalidad o parcialmente, por un agregado ligero con el fin de reducir la densidad o el peso unitario (Monteiro y Kumar, 2014).

El uso del concreto aligerado se ha convertido en tendencia con respecto a otros concretos por la gran variedad de agregados de baja densidad que se pueden usar para la producción de este. Además de la baja densidad y de ser un excelente aislante acústico y térmico, los concretos aligerados tienen alta resistencia mecánica y por esto es que ya se han implementado como concretos estructurales. (Moravia *et al.*, 2010)

Entre los agregados que se pueden usar para la producción de un concreto aligerado están las arcillas expansivas gracias a su baja densidad. Este agregado es producido por varios tipos de arcillas que se expanden debido a que durante el procedimiento térmico se presenta la descomposición de algunos de sus componentes y en consecuencia se forman gases que quedan atrapados en el interior de esta masa viscosa durante su cocción. (Moravia *et al.*, 2010)

Mediante el uso de un agregado ligero como las arcillas expansivas se obtuvieron resultados satisfactorios, como lo son densidades bajas las cuales varían entre los 1400 Kg/m<sup>3</sup> y 1900 Kg/ m<sup>3</sup>, teniendo en cuenta que la densidad de un concreto estructural convencional es de aproximadamente 2400 Kg/m<sup>3</sup>. Esto nos permite hablar de una reducción entre el 20% y el 42% de peso muerto en las estructuras realizadas mediante este tipo de concretos y adicionalmente ahorro en material. (Lilja *et al.*, 1998, pg. 16).

Así como con el concreto convencional, con el concreto aligerado se busca garantizar la resistencia a compresión, asentamiento, tamaño del agregado, los tiempo de fraguado y curado, la durabilidad, y las otras normas de calidad en la producción del concreto. También es fundamental asegurar que los agregados sean de la máxima calidad, ya que solo con variar el origen de estos, se alteran las características de la preparación de la mezcla y las propiedades del concreto.

Los estudios a nivel nacional sobre concretos ligeros fabricados con arcillas expansivas en Colombia son escasos, Martínez (2010) desarrollo un trabajo de grado donde se investigó acerca de las características de estas arcillas cocinadas y el comportamiento de un concreto elaborado con estas, adicionalmente Rodríguez (2010) elaboró un trabajo de grado similar donde aportó el análisis de estas arcillas provenientes del norte de la sabana de Bogotá.

Con este trabajo se pretende estudiar si es viable o no la implementación de un concreto estructural aligerado cuyo agregado grueso son arcillas expansivas, para que en un futuro este pueda ser implementado en Colombia, permitiendo superar nuevos retos ingenieriles que se presenten.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto de la variación de la dosificación del agregado ligero de arcilla expandida en las propiedades físicas y mecánicas de un concreto estructural aligerado.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Determinar que las arcillas expandidas térmicamente, sean aptas para su uso como agregado en un concreto estructural ligero, mediante las propiedades físicas como gravedad específica, densidad aparente, absorción y granulometría.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas del concreto estructural ligero para diferentes porcentajes de agregado ligero de arcillas expandidas térmicamente.
- Identificar los beneficios del efecto uso del concreto estructural ligero en una estructura aperturada convencional.

### **3. CONCRETO LIGERO ESTRUCTURAL**

El termino de concreto ligero estructural nació hace casi un siglo, alrededor del año de 1917, cuando Stephen J. Hayde introdujo y patentó en Estados Unidos, un proceso de producción de agregados ligeros, con el cual descubrió que si se exponen arcillas a altas temperaturas en hornos rotativos se puede producir un agregado de baja densidad, con respecto a los agregados usados comúnmente, y a su vez con buena resistencia. (Chandra y Berntsson, 2002)

A partir de este evento y después de la segunda guerra mundial, el desarrollo del concreto ligero estructural tuvo un marcado aceleramiento, sobretodo en Estados Unidos. Entre la creciente demanda de agregados para la elaboración del concreto y la poca oferta que había de estos, debido tanto a la falta de recursos naturales como en la industria, se tuvo que buscar alternativas de agregados, encontrando la solución en la producción en masa de los agregados ligeros artificiales. (Chandra y Berntsson, 2002)

Podemos encontrar una gran cantidad de clasificaciones del concreto según sus distintos aspectos. Según la densidad del concreto y el tipo de agregado encontramos los concretos ligeros y pesados, los cuales a su vez pueden tener diferentes tipos de resistencia. (Norma Sismo Resistente, 2010)

Según la ACI 213R-03 el concreto estructural ligero se define como: “aquel que tiene una resistencia mínima a la compresión a los 28 días de 17.5 MPa, que presenta una densidad en equilibrio entre 1120 y 1920 kg/m<sup>3</sup> y una consistencia completa de agregados ligeros o una combinación de agregados de peso normal y ligero”.

La norma sismo resistente colombiana, NSR-10, define el concreto ligero como: “concreto con agregado ligero que tiene una densidad de equilibrio, tal como la define NTC 4022 (ASTM C567), entre 1440 y 1840 kg/m<sup>3</sup>. El concreto ligero cubierto por el Título C del Reglamento NSR-10 corresponde a un concreto cuyos componentes cumplen de manera estricta lo requerido en este Título C”.

En la misma normativa se define concreto estructural como: “Todo concreto utilizado con propósitos estructurales incluyendo concreto simple y reforzado”.

Podemos encontrar que se considera como concreto estructural ligero aquel cuya densidad no excede los 2000 kg/m<sup>3</sup>. Las demás características dependerán del tipo de agregado ligero que se use como sustituto parcial o total.

En la construcción existe una amplia gama de materiales que se conocen como concretos ligeros, cuya principal propiedad, la cual además les da el nombre, es el reducido peso específico. Pero en si lo que tienen en común estos materiales es solo el empleo del cemento Portland en su elaboración.

Existe el concreto ligero sin finos, el cual no contiene finos. Su bajo peso se consigue por medio de generación de vacíos en su estructura y la disminución de la cantidad de cemento. Este concreto de textura porosa también es característico por su funcionalidad mecánica, donde se busca que la pasta de cemento sea la que rodee el agregado grueso y los interconecte entre sí, reemplazando los espacios vacíos que usualmente ocupaba la arena.

Entre los concreto ligeros, están también los concretos aireados los cuales son el resultado del fraguado y endurecimiento de una mezcla formada por cemento portland y agua con o sin agregados finos, la cual ha sido sometida a un tratamiento mecánico, físico o químico previo, con el fin de crear una gran cantidad de pequeñas cavidades esféricas repartidas regularmente en la mezcla y de dimensiones aproximadamente iguales. Estos espacios, llamados alvéolos, no deben presentar deformaciones o desplazamiento alguno. (Cruz *et al.*, 2003)

Finalmente, están los concretos con agregados ligeros los cuales son el resultado de la sustitución de los agregados comunes (densos) que son usados para los concretos convencionales por agregados ligeros, con el fin de lograr un menor peso específico del concreto. Este tipo de agregado puede ser de origen natural o artificial y pueden lograr densidades en el concreto menores a los  $100 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.1 Tipos de agregados ligeros.

#### 3.1.1 Agregados ligeros de origen natural.

Existen varios agregados de origen natural como lo son la piedra pómez, la diatomita y la escoria.

La piedra pómez es un material de origen volcánico, con buena resistencia mecánica y baja masa unitaria, estas características son propias de este material debido a su proceso de formación ya que estas surgen del proceso de liberación de gases y endurecimiento de la lava al fundirse por las bajas temperaturas de la atmosfera.

La piedra pómez probablemente fue el primer agregado ligero del cual se tiene registro, esto debido a que en estructuras emblemáticas del imperio romano este agregado esta se encuentra presente. (Cruz *et al.*, 2003)

La diatomita es un mineral de origen sedimentario, formado por la acumulación de restos de plantas acuáticas como las algas, a pesar de su mala resistencia a la abrasión y baja conductividad térmica, la diatomita puede tener un peso promedio entre  $450 \text{ Kg/m}^3$ . Esta también puede ser usada como materia prima para la fabricación de agregados ligeros artificiales mediante procesos térmicos. (Cruz *et al.*, 2003)

Finalmente encontramos la escoria, que al igual que la piedra pómez, es un material de origen volcánico, por lo general de color muy oscuro debido a la misma actividad volcánica, su estructura está formada por celdas de formas alargadas e irregulares las cuales no se encuentran conectadas entre sí, la escoria es un material con muy baja resistencia a la compresión y malas propiedades mecánicas. (Cruz *et al.*, 2003)

### 3.1.2 Agregados ligeros manufacturados.

Entre los agregados ligeros manufacturados encontramos la arcilla expandida térmicamente (AET), la escoria expandida y los cascotes de ladrillo.

La arcilla expandida térmicamente es un material de origen cerámico, el cual es producido industrialmente. Este material se fabrica a partir de arcilla pura extraída de canteras a cielo abierto.

En primera instancia, luego de la extracción se procede a realizar el desbaste, que consiste en separar los materiales no deseados, para posteriormente almacenar estos en naves cerradas para su homogeneización y secado. En segunda instancia cuando la arcilla ya está seca se

procede a molerla hasta obtener un polvo que se denomina crudo, el cual aglomerado con el agua en los platos granulares y por efecto de la rotación obtienen su forma esférica. Finalmente, la expansión de la arcilla se produce en hornos rotatorios a una temperatura de 1200 °C, a la cual la arcilla se comienza a fundir mientras que en su interior se produce la combustión de la materia orgánica. Estos gases que se producen en la combustión son los que expanden las bolas esféricas de arcilla. (Cruz *et al.*, 2003)



*Ilustración 1. Arcilla expandida térmicamente elaborada por Corona en el valle del Aburra*

La escoria expandida es un material de origen cerámico, el cual consiste en la fusión del residuo del mineral, los fundentes y las cenizas del coque (carbón vegetal). Químicamente está formado en un 95% por sílice, alúmina, cal y magnesia. (Cruz *et al.*, 2003)

Los cascotes de ladrillo es un material que proviene de los hornos de ladrillos, generalmente son los residuos de la fabricación de baldosas o de la recuperación de escombros. Consiste en ladrillo triturado, conformado en un 80% de arcilla con el agregado del material ligante y las impurezas. (Cruz *et al.*, 2003)

## 3.2 Propiedades en estado fresco del concreto.

### 3.2.1 Manejabilidad.

En el caso específico de los concretos ligeros elaborados con AET existen dos teorías las cuales apoyan la medición del asentamiento por medio del método de ensayo por el cono de Abrams y existen quienes consideran que el método correcto es el ensayo de mesa vibratoria. En cuanto se refiere al ensayo de asentamiento por el cono de Abrams, los investigadores concluyen que para concretos diseñados con la misma manejabilidad, el asentamiento en concretos ligeros será menor debido a la baja densidad de los agregados, también se afirma que las manejabilidades recomendables para este tipo de agregados deben ser no mayores a 10 cm, ya que tener asentamientos mayores a este valor generan flotación y segregación de los agregados ligeros además de dar un mal acabado a los concretos. (Martinez 2010).

Así mismo, autores como Weigler *et al.*, (1972) y Pankhurst (1993) mencionan en sus investigaciones que la manejabilidad de los concreto ligeros es generalmente más “suave” debido a la forma y densidad de los agregados, y adicional a esto afirman que los métodos que se usan para medir la manejabilidad en el concreto convencional también son aplicables a los concretos ligeros, pero son ensayos que tienden a sobreestimar la manejabilidad de estos. La Sociedad de concreto Alemana (1978) afirma que en el campo practico, los concretos ligeros tienden a perder más rápido la manejabilidad que los concretos convencionales, debido a las propiedades del agregado ligero.

Finalmente, Chandra y Berntsson (2002) afirman que en los concretos ligeros, es común, que la absorción de los agregados ligeros produzcan divergencias importantes en los valores de

densidad y manejabilidad. Además de esto, encontraron que las mezclas son rígidas (densas) haciendo necesario el uso de plastificantes.

### 3.2.2 Exudación del concreto.

La exudación o sangrado del concreto al igual que la segregación más que una propiedad es un fenómeno del concreto en su estado fresco, el cual consisten en que parte del agua de la mezcla tiende a elevarse a la superficie del concreto recién vaciado o luego de empezar proceso de fraguado.

Este fenómeno se da debido a que cierta parte de las partículas no pueden retener toda el agua de la mezcla y tienden a liberar el agua en la parte superior del concreto debido al asentamiento de las partículas.

Del fenómeno de exudación del concreto se derivan dos situaciones directamente ligadas a la evaporación del ambiente, ya que si la velocidad de evaporación es menor a la velocidad exudación se forman películas de agua en la superficie del concreto las cuales conllevan a una mayor relación agua cemento en la superficie y una baja resistencia al desgaste. Por otro lado si la velocidad de evaporación es mayor que la velocidad de exudación del concreto, y no se cuenta con un buen proceso de curado se presentarían grietas en la superficie. (Guzmán, 2001).

## 3.3 Propiedades en estado endurecido del concreto ligero

### 3.3.1 Densidad del concreto ligero.

La densidad es una de las propiedades más importantes para los concretos ligeros estructurales ya que esta es la consecuencia directa de la implementación de agregados

ligeros en nuestra mezcla. Del mismo modo existe una relación directa entre el tamaño de los agregados, el método de producción y la proporción de agregado ligero que se aplique en la mezcla.

La densidad de cualquier material está definida como la cantidad de masa por unidad de volumen y por lo general se expresa en  $\text{kg/m}^3$ . En el caso particular del concreto de peso normal, este cuenta con una densidad que varía entre los 2200 y 2400  $\text{kg/m}^3$ . Por otro lado la NSR-10 define al concreto ligero como “concreto con agregado ligero que tiene una densidad en equilibrio, tal como la define la NTC 4022, entre 1440 y 1810  $\text{kg/m}^3$ .”

El bajo peso del concreto ligero se debe a que existen diversas formas de reducir su peso, entre ellas la más efectiva es atacar directamente los agregados gruesos quienes ocupan el mayor volumen dentro de la mezcla y los cuales se pueden reemplazar por agregados naturales o artificiales que pesan aproximadamente un 40% menos que los agregados comunes.

Martinez (2010) afirma en sus investigaciones que los concretos realizados con un AET (AET1) resultaron más pesados en comparación con los realizados con otro tipo de AET (AET2), debido a que la densidad del agregado ligero AET 1 es mayor que el AET 2, en concretos donde las demás densidades se mantuvieron constantes. Además de esto, pone en sus conclusiones que no se lograron concretos ligeros según lo que determina la NSR-10, donde el valor máximo debe ser de 1840  $\text{kg/m}^3$ , donde obtuvo valores de 1867  $\text{kg/m}^3$  para el concreto ligero hecho con el AET 1 y de 1966  $\text{Kg/m}^3$  para el concreto ligero hecho con el AET 2.

Moravia *et al.*, (2010) encontraron concretos ligeros producidos con AET que alcanzaron densidades de alrededor  $1600 \text{ kg/m}^3$  en comparación de los  $2300 \text{ kg/m}^3$  de los concretos convencionales y resistencias que alcanzaron hasta 40 MPa. En esta investigación se encontró que la gravedad específica de los concretos es directamente proporcional a la resistencia a compresión.

También es común encontrar otras técnicas de reducción de peso como se ha mencionado anteriormente, como lo son la inclusión de aire, el limitado uso de finos o el uso de cementos de menor densidad.

La porosidad de las AET se debe a la reacción térmica a altas temperaturas que liberan gases dentro de la estructura generando vacíos internos dentro del agregado. De esta forma se generan materiales pero menos resistentes ya que no cuentan con una estructura sólida y continua que genere mayor resistencia mecánica. (Chandra y Berntsson, 2002)

La relación entre estas propiedades del agregado y la densidad del concreto ligero estructural, se basa en la cantidad de vacíos que contiene el agregado, por ejemplo, si tenemos agregados pequeños, la cantidad de vacíos será menor pero su resistencia será mayor en comparación a un agregado más grande con mayor proporción de vacíos pero menor resistencia. La presencia de vacíos en estos agregados se da debido al proceso de producción con el que se elaboran los mismos.

Por otro lado optar por concretos ligeros es una alternativa que nos ofrece una amplia gama de densidades, según el agregado ligero que se desee usar y teniendo en cuenta la resistencia que se desee alcanzar, es posible alcanzar densidades desde  $400 \text{ kg/m}^3$  hasta  $1800 \text{ kg/m}^3$ .

La densidad de los concretos ligeros depende del tipo de material con el que se fabrican los agregados ligeros y también de la técnica utilizada para su producción, estos dos son factores que influyen directamente en esta propiedad y por lo cual es difícil especificar una densidad para ciertos materiales aptos para la fabricación de agregados aligerados. (Chandra y Berntsson, 2002).

Por otra parte los agregados no son los únicos que afectan la densidad de los concretos ligeros, también factores como la buena gradación de los agregados, el contenido de humedad, el diseño de mezcla, el contenido de cemento, la relación agua cemento, etc., son factores que contribuyen a obtener mejores densidades, así como lo es la manipulación de la muestra por ejemplo la compactación y las condiciones de curado.

### 3.3.2 Resistencia a la compresión.

De acuerdo con la ASTM C330 estándar, el concreto ligero debería tener una resistencia a compresión mayor a 17 MPa a los 28 días de edad, el cual se debe determinar por la falla a compresión axial de los especímenes cilíndricos.

Por otro lado la norma brasilera NBR 6118 estándar especifica un valor mínimo de 20 MPa para concretos estructurales, pero en la cual no se especifica acerca de concretos ligeros.

La resistencia a compresión en concretos ligeros depende factores como el tipo de agregado, la relación A/C, la cantidad de cemento usado, la edad del concreto, entre otros. (Chandra y Bernsston, (2002),)

Adicionalmente Bilodeau, *et al.*, encontró que la resistencia a la compresión depende de la resistencia de los agregados ligeros y de la absorción de los mismos.

Moravia *et al.*, (2010) muestra en su investigación, la cual consistía en evaluar el factor de eficiencia y el módulo de elasticidad en un concreto ligero con agregado en base a AET, una comparación entre las resistencias del concreto convencional contra el concreto ligero en donde luego de evaluar la resistencia a compresión a 3 días, 7 días y 28 días, que la resistencia en los concretos hechos con agregado ligero se ve reducida entre un 22% y un 28% con respecto al concreto convencional. Como se puede observar en la Ilustración 2 a continuación:

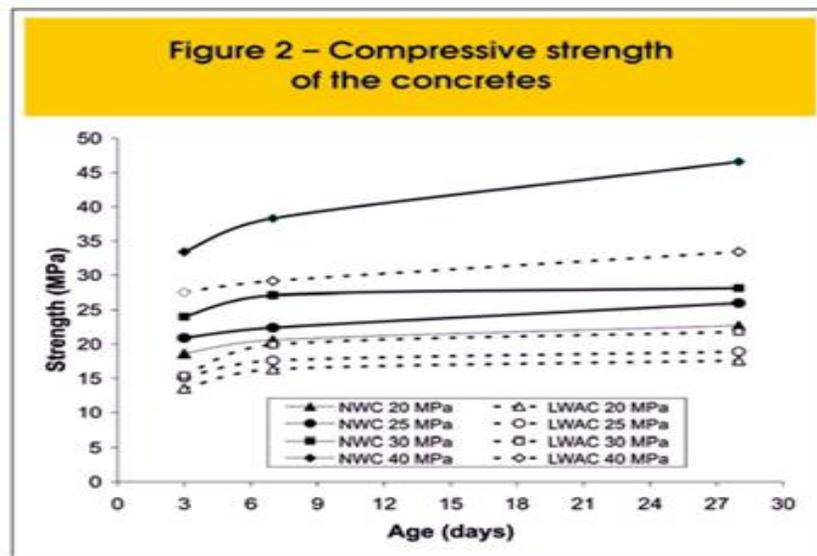


Ilustración 2. Esfuerzo a la compresión. Tomado de: Moravia et al., 2010.

A continuación se presenta una revisión de algunos de estos factores que tienen particular influencia en la resistencia a compresión de los concretos con agregados ligeros y las diferencias con respecto al concreto convencional.

### 3.3.2.1 La relación A/C efectiva de la mezcla

La incertidumbre que se tiene acerca de la efectiva relación A/C aumenta cuanto mayor es la absorción del agregado ligero, y como en los concretos convencionales la relación A/C determina en gran parte la resistencia a la compresión. Esto explica porque esta propiedad sea casi función del valor de absorción. (EurolightCon, 1998)

Se ha reportado en otras investigaciones que el uso de agregados ligeros en su estado seco conlleva a una disminución en la resistencia a compresión, debido a que durante el periodo de mezcla y secado hay un intercambio de agua y aire entre los agregados y la pasta. Esto genera que en el estado endurecido el concreto presente burbujas de aire alrededor del área de transición entre el agregado y la pasta y es la causa de la disminución en la resistencia a compresión. Como reportaron Helland y Maage (1995), a pesar de esto, el uso de agregado seco presentó una resistencia a compresión mayor por 6 Mpa comparado con el agregado en estado SSS.

Por otro lado, Punkki and Gjorv (1995) demostraron en sus investigaciones que la absorción de los agregados depende no solo de las propiedades de los agregados sino incluso de las condiciones de la mezcla, la forma de mezclado y de las propiedades de la pasta. Observaron que entre mayor fuera la absorción de los agregados menor era la manejabilidad, pero que la resistencia a compresión aumenta. Entre sus resultados encontraron que el agregado seco resiste alrededor de 10 MPa más que el agregado en estado SSS.

En contraste con las mezclas hechas por Helland y Maage (1995), en las de Punkki y Gjorv (1995) no se encontró el círculo de burbujas alrededor de la zona de transición entre el agregado y la pasta.

De estas dos investigaciones se concluyó que en efecto el uso de agregado seco, implica una mayor resistencia del concreto debido a la absorción y al buen mezclado, el cual disminuye el contenido de aire atrapado.

Chandra y Bertsson (2002) concluyeron que “debido a la absorción de agua de los agregados ligeros, la relación agua-cemento en las mezclas de concretos ligeros no es directamente comparable a los concretos convencionales. Sin embargo, el efecto de agua libre en la mezcla es similar a la de los concretos convencionales. En general, la resistencia a la compresión se reduce cuando el agua libre aumenta.”.

### 3.3.2.2 La resistencia de los agregados ligeros.

Lo interesante acerca de los concretos con agregados ligeros es que la resistencia de los agregados en realidad es baja. Esto resulta en que la resistencia dada por la matrix y el alcance de esta en lo que rodea el agregado sea lo que controle la resistencia del concreto (Bardhan-Roy, 1995).

Smeplass (1992), escribió que si se busca aumentar la resistencia del concreto con agregados ligeros se debe encontrar un agregado ligero con mayor resistencia.

En otra investigación en la cual se examinaron especímenes de concreto con agregado ligero fallados, se encontró que a diferencia del concreto convencional, la falla se produjo en el agregado y no en la zona de transición que es normalmente el componente más débil del sistema (Monteiro y Kumar, 2014).

Moravia *et al.*, (2010) en su investigación encontró que el mayor decremento de la resistencia de la mezcla de concreto se podía explicar por la baja resistencia del agregado ligero.

Todas estas investigaciones concuerdan en que hay una estrecha relación entre la resistencia del concreto y la de los agregados ligeros que componen la mezcla.

En la investigación realizada por Martínez (2010) se analizaron dos tipos de AET, uno proveniente de la producción estandarizada de este material en Venezuela (AET 1) y el otro proveniente de la sabana de Bogotá (AET 2). Se encontró que los concretos realizados con el AET 1 alcanzaban resistencias mayores al AET 2, diferencia que no estaba influenciada por las diferencias de las características del cemento y de la arena puesto que se utilizaron las mismas, a pesar de que el AET 1 presentara una masa unitaria entre  $400 \text{ kg/m}^3$  y  $580 \text{ kg/m}^3$  y el AET 2 presentara una masa unitaria de entre  $1060 \text{ kg/m}^3$  y  $1120 \text{ kg/m}^3$ . Lo que permitió concluir que es la resistencia de los agregados, la que más influye en la resistencia de los concretos

#### 3.3.2.3 Densidad de los agregados.

Al aumentar la resistencia, en todos los agregados ligeros estudiados, aumenta la densidad del concreto aproximadamente en igual medida sin alcanzar todo el campo de resistencias. Esto se debe a que al aumentar la resistencia disminuye el contenido de agregados ligeros, aumentando la proporción de la masa de cemento, que es más resistente.

#### 3.3.2.4 Homogeneidad.

Es muy importante en una mezcla de concreto que haya homogeneidad entre sus elementos: es decir que la matriz y el agregado sean lo más homogéneo posible, esto se debe a que la resistencia a la compresión está dada por la interacción entre los elementos que componen la mezcla, en donde la falla será el resultado de la resistencia limitada de uno de sus elementos.

En el caso de los concretos con agregado ligero esta falla se debe al colapso de los granos del agregado ligero debido posiblemente a que la máxima capacidad de resistencia a compresión la alcanza en ese punto, mientras que en un concreto convencional es el resultado de la falla del concreto en la zona de transición debido a la separación entre las dos fases. (EuroLightCon, 1998)

### 3.3.3 Módulo de elasticidad del concreto.

El módulo de elasticidad ( $E$ ) de un concreto, es aquella propiedad del concreto que relaciona los esfuerzos actuantes a compresión contra la deformación axial de este material. Esta propiedad depende en gran parte del módulo de elasticidad de la pasta de cemento ya que en los concretos de peso normal, es posible observar que al exponerlos a un ensayo de resistencia a la compresión, estos fallan en el interfaz entre la pasta y los agregados gruesos, debido a la diferencia de comportamiento mecánico entre ambos componentes, normalmente a este fenómeno se le denomina microfisuramiento. (Rodríguez, 2010)

En el caso del concreto ligero el fenómeno de microfisuramiento no es muy común debido a que los agregados de arcilla expandida térmicamente, se comportan de manera muy similar al mortero del concreto, por lo tanto al tener un módulo de elasticidad muy parecido el comportamiento del concreto ligero es lineal hasta un 90% de su resistencia hasta llegar al punto de falla como se aprecia en la Ilustración 3. (Martínez, 2010)

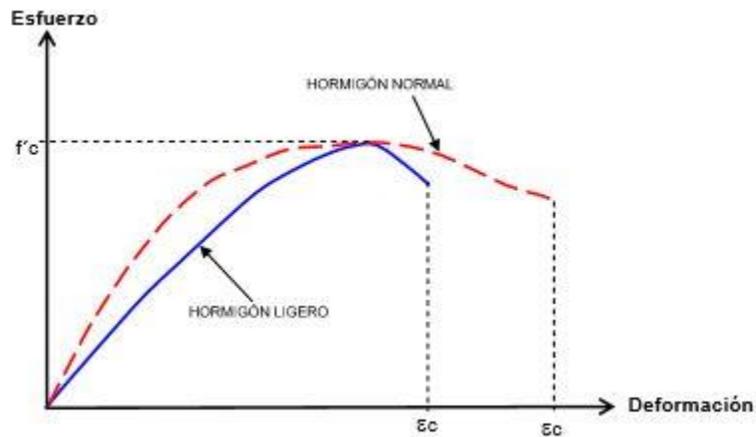


Ilustración 3. Deformación vs Esfuerzo. Tomado de: Chandra y Bertsson, 2002.

A pesar de este comportamiento homogéneo el módulo de elasticidad de los concretos ligeros es generalmente menor al módulo de elasticidad de un concreto de peso normal, según Khokhorin (1973) quien estudio más a fondo la interacción que existe entre la interfaz de mortero entre los agregados de peso normal en comparación a la interacción con los agregados ligeros de arcillas expandidas térmicamente, encontró que a pesar que en los concretos ligeros existe una mayor cohesión entre la pasta y los agregados de arcilla debido a una reacción química entre los productos de hidratación del cemento y una serie de aluminatos que se forman en la capa vitrificada de las AET. El módulo de elasticidad generado por estos dos componentes es menor al que genera un concreto de peso normal con agregados mucho más rígidos. (Chandra y Bertsson, 2002)

#### 3.3.4 Permeabilidad.

La durabilidad de un concreto está directamente relacionada con su permeabilidad, es así como el comité de la ACI-201 define la durabilidad del concreto hidráulico como su resistencia a la acción del clima (meteorización), a los ataques químicos, a la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro.

De acuerdo EuroLightcon (1998) se puede pensar el concreto aligerado con AET no es necesariamente más permeable que el concreto de peso normal, esto se debe a que, a pesar de tener agregados más porosos, la matriz que cubre este material continúa siendo la misma pasta de cemento, y si se hace un símil entre un concreto de peso normal y un concreto ligero de iguales resistencia, los resultados de porosidad serán bastante parecidos debido a que para alcanzar la misma resistencia en el concreto ligero la reducción de la relación A/C es inevitable, lo que de algún modo compensara las baja resistencia a compresión de los agregados.

#### **4. DISEÑO EXPERIMENTAL**

Con el fin de evaluar el efecto de la dosificación de AET en los concretos, se propone realizar el diseño experimental en las etapas descritas a continuación:

- La primera parte de la investigación, se enfoca en la caracterización del agregado ligero, con el fin de determinar algunas propiedades del agregado, como su densidad, su granulometría, la absorción y la gravedad específica.
- La segunda parte de la investigación busca determinar la influencia de las AET de producción nacional, en el cambio de las propiedades físicas y mecánicas de un concreto estructural ligero. Para lo cual se pretende determinar 4 % de reemplazo del agregado ligero por grava común y de este modo determinar de una manera más precisa la influencia de estos agregados.
- Por último se pretende investigar acerca de los efectos en los beneficios del uso de este tipo de concretos ligeros en una estructura convencional aporricada.

##### 4.1 Caracterización de la AET.

La arcilla expandida, usada es un material aligerante pétreo obtenido mediante un proceso industrial de expansión y sinterización de arcillas naturales, producido en el valle del Aburra. Esta AET está exenta de materia orgánica, es altamente estable en el tiempo, inerte y compatible con materiales comúnmente usados en la construcción, tales como cemento, agregados finos y gruesos de densidad normal, aditivos, cerámicos, entre otros.

Con el objetivo de cumplir con el primer objetivo y poder posteriormente cumplir con los demás objetivos se procedió primero a obtener el material conocido como AET y

posteriormente a realizar los ensayos de laboratorio procediendo con respecto a las normas técnicas colombianas especificadas.

Los ensayos realizados para la caracterización del material son:

- Granulometría (NTC 77, NTC 78 y la NTC 4045)
- Masa unitaria (NTC 92)
- Absorción (NTC 176 y NTC 237)
- Gravedad específica (NTC 237)

#### 4.2 Diseño de mezcla

El conocimiento sobre las propiedades físicas del agregado ligero, el agregado convencional y el cemento tienen como finalidad primordial la de determinar el diseño de mezcla y es por esto tan importante los resultados de los ensayos hechos.

Existen varios métodos para el proporcionamiento de los ingredientes de una mezcla de concreto, el método utilizado es el descrito en la ACI 211.1 el cual se fundamenta en el principio básico de la relación A/C desarrollada por Abrams. Para hacer uso de este método es necesario hacer el proporcionamiento teniendo en cuenta que estos cumplan con las recomendaciones granulométricas de la norma NTC 174 y la ASTM C33, y en este caso en específico para el uso de agregados ligeros con las de la NTC 4045, basada en la ASTM C330.

El objetivo de realizar un diseño de mezcla es determinar la combinación más práctica de los materiales disponibles, para producir un concreto que satisfaga los requerimientos buscados. (ACI 211.1, 1991)

Una mezcla de concreto se diseña buscando cumplir con las principales exigencias del proyecto a realizar, y es por esto que este debe cumplir con unas buenas propiedades tanto en su estado fresco como endurecido.

Una propiedad del concreto fresco que depende del diseño de mezcla y se busca controlar es la manejabilidad, ya que este rige las técnicas de colocación y transporte y este a su vez influye en los costos del equipo y mano de obra.

Algunas de las propiedades del concreto endurecido que dependen del diseño de mezcla y se buscan controlar son especialmente la resistencia, durabilidad, acabado y en algunos casos el peso volumétrico, como cuando se trata con concretos ligeros.

Por supuesto, todas estas propiedades carecen de importancia si el proyecto no resulta factible debido a costos y es por esto que en un diseño de mezcla la economía cobra relevancia entre sus objetivos.

Para poder hacer la dosificación, primero se deben conocer las propiedades de los materiales con los cuales se va a hacer la mezcla de concreto. Las propiedades que se deben conocer son:

- Granulometría de la grava, arena y la arcilla expandida térmicamente
- Módulo de finura de la arena
- Tamaño máximo nominal de la grava y de la arcilla expandida térmicamente
- Densidad aparente de la grava, arena y la arcilla expandida térmicamente
- Absorción de la grava, arena y la arcilla expandida térmicamente
- Densidad del cemento
- Humedad de los agregados inmediatamente antes de hacer las mezclas

EL diseño de mezcla se realizó para un asentamiento de 7.5 cm. Se hizo uso de un aditivo con el fin de obtener mayor manejabilidad en el concreto. Entre otras variables consideradas están el uso como agregado grueso de grava de 1” y arena gruesa, con el fin de ser usado para losas, muros, columnas y vigas.

#### 4.3 Diseño experimental concretos ligeros con AET

Para el desarrollo experimental de los concretos ligeros hechos con la arcilla proveniente del valle de aburra, fue necesario considerar las características no solo del agregado ligero, también de los otros componentes como el cemento, la arena y la grava.

##### 4.3.1 Materiales.

Los criterios de selección de materiales para la producción del concreto, se basaron más que todo en el criterio de control de dispersión de los resultados, por ende se eligieron arenas, gravas, cemento y plastificantes de los cuales se pudieran contar con suficiente cantidad, para asegurar que todos los materiales tienen la misma procedencia y lote de producción en su caso.

Los materiales en su totalidad fueron donados por la empresa CEMEX S.A. y el listado de estos se encuentra continuación.

- Arena gruesa proveniente de la cantera Agregados nacionales.
- Grava de 1” proveniente de la cantera Floresta.
- Cemento estructural CEMEX. Planta caracolito fecha muestreo (07-septiembre-2015).
- Super plastificante isoflow por Sika.
- Agregado ligero producido por Corona.

#### 4.3.2 Procedimiento.

El procedimiento que se consideró apropiado para la producción de un concreto ligero con arcillas expandidas del valle de aburra, basados en la bibliografía consultada fue el siguiente.

- Para hacer el diseño de mezcla se usó como base la metodología propuesta por la ACI 211.2.
- En primera instancia se realizó una serie de mezclas en donde solo se varió el porcentaje del agregado ligero como agregado grueso, para comprender mejor la influencia del agregado ligero en el concreto (Tabla 1). Para esto se definieron cuatro porcentajes de reemplazo en peso de AET por grava común como se observa en la Tabla 2:

*Tabla 1. Dosificación para la misma relación A/C*

SERIE 4	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
AET( %)	0	25	50	100
A/C	0.74	0.74	0.74	0.74

*Tabla 2. Dosificación grava 1" vs Dosificación AET*

Mezcla	1	2	3	4
AET( %)	0	25	50	100
Grava 1" (%)	100	75	50	0

Es importante decir que el AET se usó en su estado SSS, debido a que en la bibliografía consultada se afirma que para la preparación de mezclas de concreto es lo más apropiado. Para esto se procedió a sumergir el agregado en agua por un periodo de 24 horas y posteriormente retirarle el agua y homogenizar el material. Todo esto con el fin de reducir la incertidumbre acerca de su relación A/C.

- Para la primera serie hecha, se procedió a realizarle ensayos de resistencia a compresión a 7 y 28 días, masa unitaria, módulo de elasticidad y permeabilidad.

- Basados en la información de la primera serie, cuyas mezclas todas tenían relación A/C constante, se determinaron los porcentajes apropiados de relación A/C para compensar el efecto del uso de agregado ligero en la resistencia del concreto. Para esto se establecieron las siguientes relaciones A/C, favoreciendo a las mezclas con mayor porcentaje de AET.

*Tabla 3. Dosificación para diferente relación A/C*

SERIE 5	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
AET( %)	0	25	50	100
A/C	0.7	0.63	0.616	0.574

- Se procedió a realizar dos series, con la relación A/C presentada en la Tabla 3. Por cada mezcla se realizaron 12 cilindros de concreto con el fin de realizar los siguientes ensayos del concreto en estado endurecido.
  - 3 cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para determinar la resistencia a compresión a edad de 7 días. (NTC 673: Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto)
  - 3 cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para determinar la resistencia a compresión a edad de 28 días. (NTC 673: Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto)
  - 3 cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para determinar el módulo de elasticidad a edad de 28 días. (NTC 4025: Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión)
  - 3 cilindros adicionales de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura partidos por la mitad para medir la permeabilidad de los cilindros a edad de 28 días. (NTC 4483: Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua)

En estado fresco se le realizó a todas las mezclas el ensayo de cono de Abrams y masa unitaria.

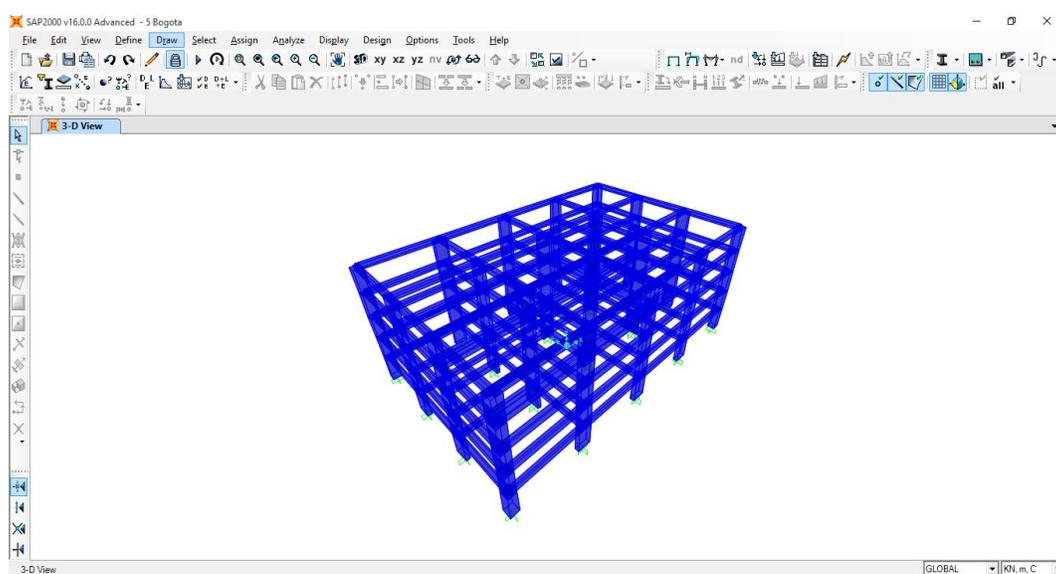
Posteriormente los cilindros se sometieron a curado por inmersión de agua en el cuarto de curado de la universidad Javeriana a temperatura y humedad controlada, los cuales se sometieron a ensayo de resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días.

A continuación se hará una descripción más específica de los ensayos realizados al concreto en estado fresco y en estado endurecido:

- Ensayo de asentamiento (NTC 396: “Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto”) y procedimiento para la elaboración de los especímenes cilíndricos.
- Ensayo de masa unitaria (NTC 1926: “Método para determinar la masa unitaria, rendimiento y contenido de aire por gravimetría del concreto”)
- Ensayo de resistencia a compresión (NTC 673: Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto)
- Ensayo de módulo de elasticidad (NTC 4025: Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión)
- Ensayo de permeabilidad (NTC 4483: Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua)

## 5. MODELOS NUMERICOS

Con el fin de montar un modelo numérico de una estructura aporticada convencional, apta para la identificación de los beneficios que conlleva el uso de concretos ligeros fue necesario usar como referencia un modelo ya desarrollado que cumpliera con las normativas estructurales vigentes (nsr-10), para la obtención de este modelo se contó con la colaboración de los estudiantes de pregrado Edgar Patiño Hamón y Andrea Bernal Cuellar y el profesor Daniel Mauricio Ruiz, quienes nos compartieron un modelo estructural en el programa SAP2000 de una estructura aporticada de 5 pisos con uso residencial, como se muestra en la siguiente Ilustración 4.



*Ilustración 4. Modelo SAP 2000*

Como respaldo del cumplimiento de la estructura ante las normas sismo resistentes vigentes (NSR-10), el modelo es tomado de una tesis de grado ya aprobada y calificada en la universidad javeriana (Análisis dinámico no lineal de pórticos tridimensionales sometidos al sismo de Quetame (2008)).

Luego de verificar que el modelo cumple con las especificaciones técnicas necesarias, se procede a determinar cuántos modelos se reproducirán a partir del modelo original que garanticen la efectiva identificación de beneficios estructurales del uso de los concretos ligeros. A lo cual se seleccionaron los siguientes tres concretos obtenidos en el laboratorio.

*Tabla 4. Propiedades del concreto*

Concreto	Dosificación (%)	Relacion A/C	F'c (Mpa)	Modulo E (MPa)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
1	0%	0.7	28	20128	2460.5
2	25%	0.63	28	18792	2253.5
3	50%	0.616	28	15916	2113.3

Cabe aclarar que las densidades presentadas en la tabla anterior no coinciden con sus valores originales, debido a que estos valores corresponden a la suma de dichas densidades originales más un 3% de cuantía de acero estructural A36, con el fin de obtener resultados más acertados y veraces. Además de esto, para los modelos se usó de una resistencia a compresión de 28 MPa para un mejor análisis.

Basados en los tres concretos seleccionados bajo el criterio de resistencia constante se divide los ítems de la modelación en los siguientes subcapítulos.

#### 5.1 Peso muerto de la estructura.

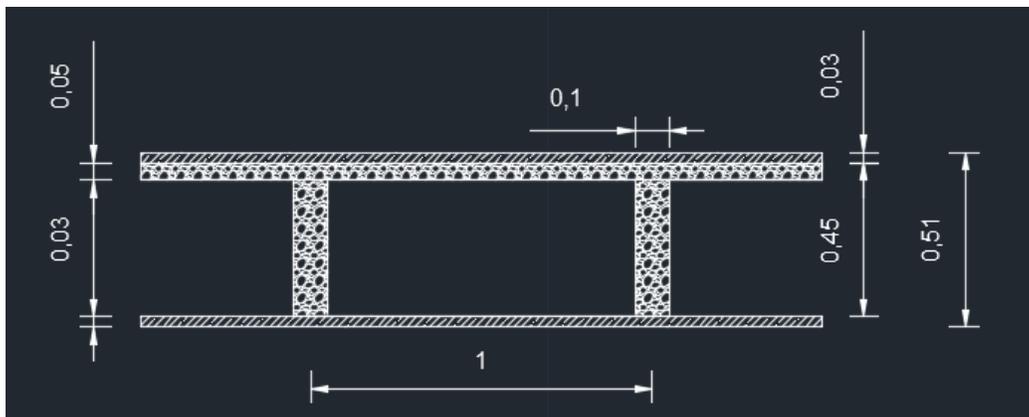
Para el análisis de cargas muertas de los distintos modelos, se identificaron los elementos estructurales diseñados en concreto, para posteriormente realzar sus respectivas modificaciones, donde se encontró que los elementos son los siguientes.

- Vigas principales.
- Vigas secundarias.

- Columnas.
- Entrepiso.

Posterior a identificar los elementos estructurales que contribuyen con el peso muerto de la estructura, se procede reemplazar las cargas de cada uno de ellos por medio de la modificación de las propiedades del concreto original y los cálculos de las cargas de entrepiso.

Debido a la falta de información del modelo original, es necesario definir una nueva sección de entrepiso, con el fin de calcular una carga muerta comparable entre los 3 modelos planteados.



*Ilustración 5. Sección entrepiso*

Para la sección de entrepiso se definieron viguetas de 45 x 10 cm, con una separación entre ejes de 1 metro, una torta de concreto de 5 cm de espesor con una capa de acabados de 3 cm, también se definió un cielo raso para el acabado inferior de la placa, y asignando una carga de muros divisorios para los cálculos de carga muerta.

Posteriormente se calcula la carga por metro cuadrado del nuevo entrepiso para los diferentes tipos de concreto, obtenido los siguientes resultados.

Tabla 5. Carga muerta por m<sup>2</sup>

CARGA MUERTO POR METRO CUADRADO			
Dosificación (%)	0	25	50
CARGA (KN/M <sup>2</sup> )	6.28	6.11	5.99

Finalmente y luego de haber modificado las cargas muertas generadas por el nuevo entrepiso y por las nuevas propiedades del material en elementos como vigas y columnas, se corre el modelo y se imprimen las reacciones en la base teniendo en cuenta solo las combinaciones de carga ya definidas:

- DEAD.
- 1.4 D
- 1.2D + 1.0 L
- 1.2D + 1.6 L

Con los resultados tabulados se procede a sumar la cantidad de carga en (KN) que se genera por cada combinación para su posterior análisis.

## 5.2 Análisis de derivas.

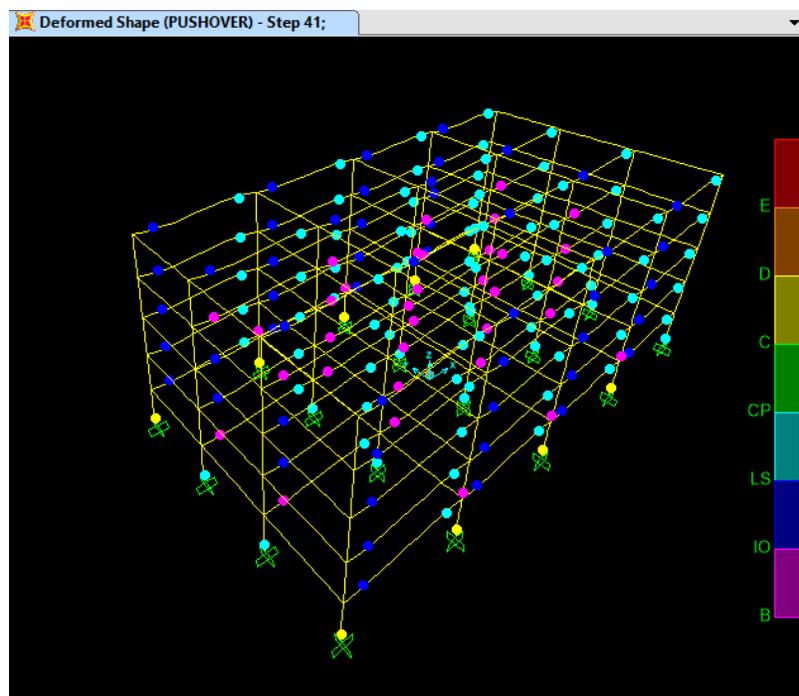
El procedimiento adaptado para analizar y comparar las derivas de los tres diferentes modelos, consistió en analizar los desplazamientos generados en un vértice del edificio a la acción del sismo (Ccopr, 2010), el cual ya estaba cargado en el modelo original.

Para el cálculo de la deriva se corrió el modelo, con el caso de carga time history (Ccrop) no lineal, posterior a esto se imprimieron las tablas de desplazamiento vs tiempo, para los nudos seleccionados anteriormente, obteniendo los máximos desplazamientos en dirección X y Y, para el sismo seleccionado.

### 5.3 Análisis Pushover.

La metodología del análisis pushover consiste en analizar el comportamiento de la estructura ante un desplazamiento en la cubierta el cual es controlado, es decir que se fija un desplazamiento deseado (0.6 m) y el programa (SAP 2000), genera la fuerza necesaria para que esta estructura pueda llegar a dicho nivel de desplazamiento.

El análisis pushover mostrará en sus resultados, los niveles de servicio de la estructura a medida que esta llega al desplazamiento deseado, es decir mostrara el número de elementos estructurales en sus diferentes estados de servicio hasta el colapso a medida que este se acerca a dicha distancia fijada por el usuario. Como se puede apreciar en la siguiente Ilustración 6.



*Ilustración 6. Estados de servicio para análisis pushover*

### 5.4 Fuerzas y deflexiones.

La metodología de este subcapítulo consiste en la selección de dos elementos estructurales importantes, para este caso una viga carguera central y una columna central, a las cuales y

tras ser sometidas a las distintas combinaciones de carga y al caso de sismo, se encontraron y definieron sus cargas máximas de momentos, cortantes, axiales y deformaciones máximas, con el fin de comparar el comportamiento de cada uno de estos elementos con respecto al cambio de material.

Todo lo anterior se hace con el ánimo de poder identificar los verdaderos beneficios del uso de los concretos ligeros obtenidos a la luz de los cálculos, y así poder definir los criterios de diseño de estos elementos.

Este subcapítulo de fuerzas y deflexiones cuenta con un apartado dedicado al cálculo del volumen de concreto ahorrado, el cual se basó en los criterios de reducir la sección proporcionalmente a la reducción de las fuerzas que influye tanto para la viga y para la columna. Es importante tener en cuenta que solo se tomó en cuenta el volumen de concreto más no las cantidades de acero.

#### 5.5 Cortante basal.

Para calcular el cortante basal se procedió a proseguir con las especificaciones que se encuentran en el capítulo A-12 de la Norma Sismo Resistente del 2010.

Para el análisis de la estructura aporticada se procedió a diseñar un espectro para la ciudad de Bogotá.

Se procedió a calcular la fuerza que se genera como reacción de una fuerza accidental para cada piso, en donde las variables son el peso y el espectro de diseño.

Para la segunda parte de este subcapítulo se procedió a determinar las curvas de desplazamiento vs cortante basal que se generan al crear un análisis de pushover en el programa SAP 2000.

## 6. ANÁLISIS DE COSTOS.

### 6.1 Costo del concreto ligero.

Este capítulo pretende enmarcar la investigación en un contexto más práctico en el ejercicio profesional, es por esta razón que el análisis de costos de este tipo de concretos se convierte en un ítem fundamental.

Para el desarrollo de este capítulo se analizarán los costos unitarios de los materiales y la importancia que estos adquieren según el tipo de concreto ligero deseado. La lista de precios usados para este análisis fue basada en información suministrada por la empresa CEMEX.

*Tabla 6. Costos unitarios*

ITEM	PRECIO	UNIDAD
cemento	\$410	Kg
arena	\$55,000	ton
grava	\$57,000	ton
agua	\$7	kg
isoflow	\$8,000	kg
arcilla	\$127,000	ton

Posteriormente y basados en los diseños de mezcla determinados para cada uno de los cuatro porcentajes de reemplazo con resistencia teórica constante, se calculó el costo de cada uno de los concretos contemplados en el trabajo de investigación (0%, 25%, 50% y 100%).

Tabla 7. Cantidad por m<sup>3</sup> de concreto de cada material

Diseños de mezcla				
Dosificación (%)	0%	25%	50%	100%
Cemex Estructural (KG)	275	275	275	275
Agua (Kg)	192.5	173.25	169.4	157.85
Arena Nacionales (Kg)	824.09	735.23	640.30	719.72
Grava 1" Cayto (Kg)	929.30	739.46	552.15	0.00
Arcilla Expandida 1" (Kg)	0.00	216.47	410.31	755.12
Ceniza Volante (Kg)	0	0	0	0
Aire (Kg)	0.02	0.02	0.02	0.02
Isoflow (Kg)	0.69	1.24	1.24	1.79

Una vez obtenido el costo de cada uno de los concretos ligeros y soportando esta información con las dosificaciones de cada uno de estos, es necesario analizar no solo como varían los costos del producto según la cantidad de AET que sea necesaria, también será necesario analizar e identificar la importancia que cobra cada uno de estos a medida que varían los porcentajes de dosificación.

Para el analizar como cobran importancia en el costo cada uno de los materiales en la mezcla, es necesario analizar mediante el análisis unitario su porcentaje de participación en el costo total. Identificando como no solo varía la cantidad de AET, también observar que este requiere más aditivo a medida que aumentamos la AET y reducimos la relación A/C para alcanzar una resistencia constante.

## 6.2 Costos en la estructura en concreto.

Basados en la caracterización de los concretos ligeros, la modelación de estructuras aporticadas y los costos de concretos ligeros. Es posible determinar un estimado del costo de la súper estructura en concreto, entendiendo esta como (columnas, vigas, viguetas, riostras y losas de entrepiso).

Todo lo anterior con el fin de comparar las ventajas prácticas de estos concretos ligeros frente a los concretos convencionales, para esto fue necesario determinar varias combinaciones de concretos ya que como se observó en los capítulos anteriores ( Modelos Numéricos) que los concretos ligeros presentan desventajas estructurales en su módulo de elasticidad frente a los concretos convencionales, es por esto que se determinó no usar los concretos ligeros en elementos estructurales como vigas y columnas.

Conforme a la información anterior y basada en el modelo estructural expuesto en el capítulo de métodos numéricos se proponen 4 casos de estudio distintos para el análisis de costos de la estructura descritos en la siguiente tabla.

*Tabla 8. Especificación de los modelos numéricos*

Numeración	Estructura (vigas y columnas)	Entrepiso
ED 0-0	Concreto convencional	Concreto convencional
ED 0-25	Concreto convencional	Concreto Aligerado (25%)
ED 0-50	Concreto convencional	Concreto Aligerado (50%)
ED 0-100	Concreto convencional	Concreto Aligerado (100%)

En las 4 estructuras anteriormente descritas, no solo se pretenden analizar el costo de cada una de ellas, también se pretende confrontar como cambian los pesos muertos de cada una de estas, con el fin de contrastar los resultados en un contexto de análisis costo beneficio.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

El siguiente capítulo pretende mostrar de forma clara y consistente los resultados obtenidos a cada uno de los objetivos específicos para así dar una respuesta satisfactoria al tema de investigación planteado.

### 7.1 Caracterización de la arcilla expandida térmicamente, proveniente del valle del Aburra.

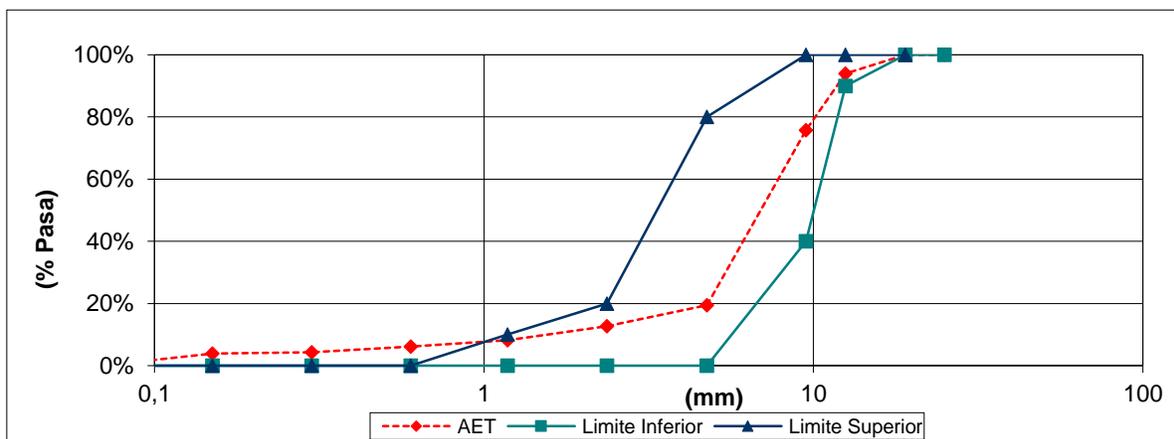
Para caracterizar el agregado ligero producido por la empresa Corona S.A., se consideró necesario realizar los ensayos de granulometría, masa unitaria, densidad y absorción. Todos los anteriores ensayos se realizaron según las normas técnicas colombianas NTC vigentes.

#### 7.1.1 Granulometría (NTC 4045, NTC 77 y NTC 78).

Los resultados de granulometría mostrados a continuación se dividirán en cuatro secciones, siguiendo el siguiente orden:

##### A. Granulometría agregado ligero. (NTC 4045, 1997)

Los límites utilizados para la calificación del agregado ligero corresponden a la NTC 4045 (1997) para agregados gruesos de 12.5 mm o 1/2 “.

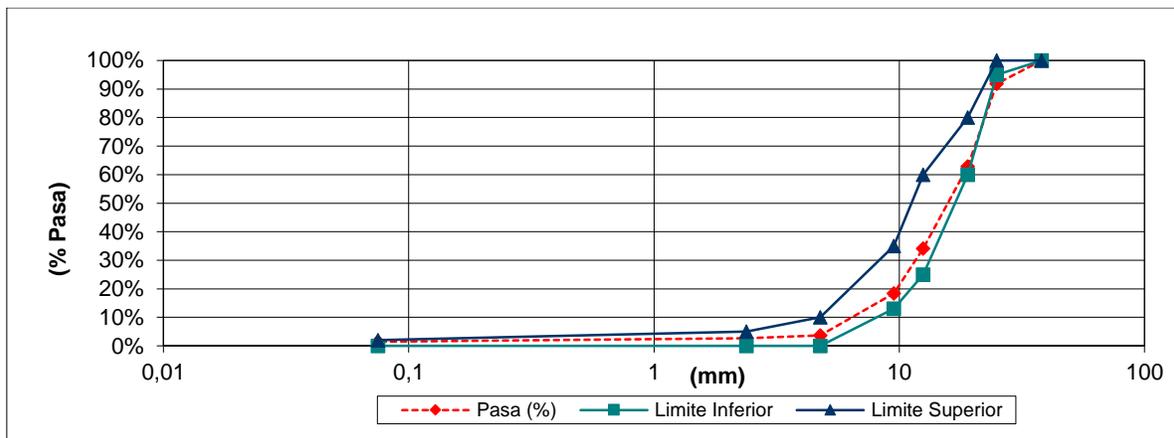


Gráfica 1. Granulometría agregado ligero (AET).

Como es posible observar, el AET del valle de aburra presenta falencia para encajar como agregado grueso de ½” debido a la gran cantidad de pasante del tamiz #16 en adelante, a pesar de esto, estos son los límites que más encajan para caracterizar el agregado ante la norma NTC 4045.

### B. Granulometría agregado grueso convencional

Los límites utilizados para la calificación del agregado grueso corresponden a la NTC 77 para agregados gruesos de 25 mm o 1”.

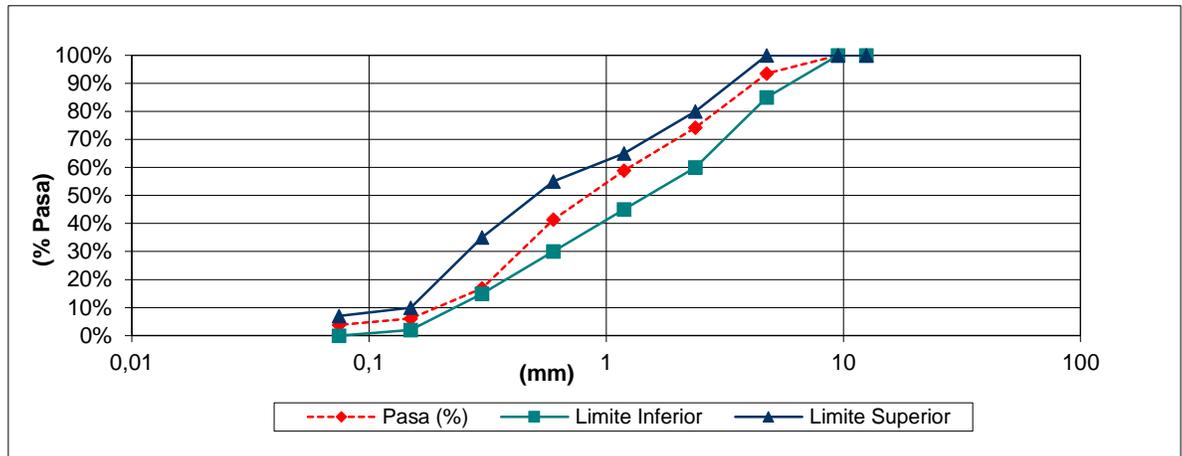


Gráfica 2. Granulometría agregado grueso (grava 1")

El agregado grueso de 1” cumple a cabalidad con los límites de gradación mencionados en la NTC 77.

### C. Granulometría de la arena (NTC 78, 1995)

Los límites utilizados para la calificación de la arena corresponden a la NTC 78 para arena gruesa.



Gráfica 3. Granulometría agregado fino (arena gruesa)

En la Gráfica 3 es fácil apreciar que la arena gruesa cumple a cabalidad con los límites de gradación mencionados en la NTC 78.

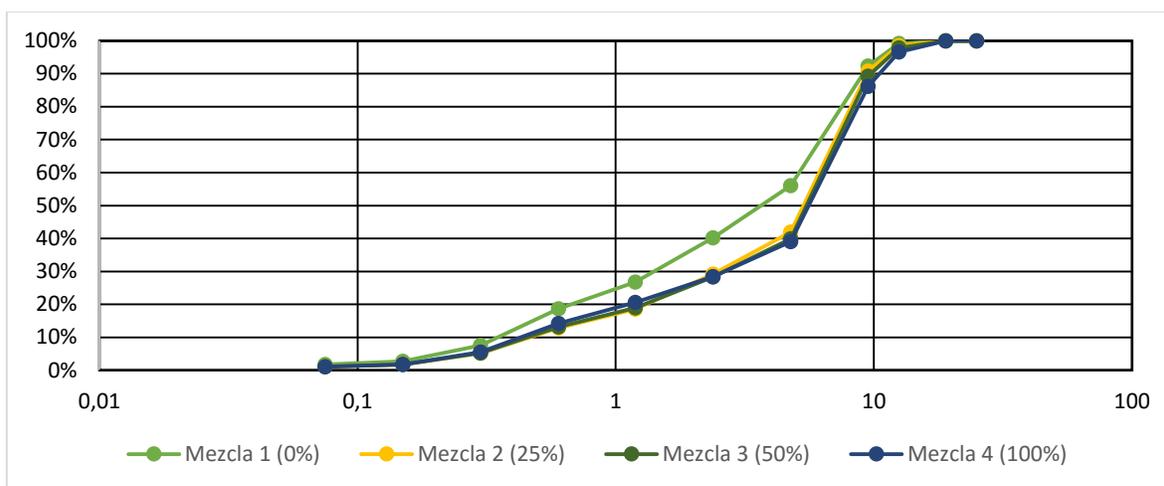
#### D. Granulometría combinada.

Se muestra en la Tabla 9 como son las nuevas granulometrías para las mezclas de concreto, combinando la grava, la arena y la arcilla expandida térmicamente, reemplazando la grava gradualmente por AET en 25%, 50% y 100% respectivamente y obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 9. Granulometría del material combinado

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA						
		Grava	Arcilla	Arena	MATERIAL COMBINADO			
mm	Pulgadas				AET (0%)	AET (25%)	AET (50%)	AET (100%)
25	1"	100%	100%		100%	100%	100%	100%
19	3/4"	100%	100%		100%	100%	100%	100%
12.5	1/2"	98%	94%	100%	99%	99%	99%	97%
9.5	3/8"	86%	75%	100%	92%	91%	91%	86%
4.76	N° 4	25%	17%	94%	56%	42%	40%	39%
2.38	N° 8	12%	9%	74%	40%	29%	28%	28%
1.19	N° 16	1%	5%	59%	27%	19%	20%	21%
0.6	N° 30		3%	41%	19%	13%	14%	14%
0.3	N° 50		1%	17%	8%	5%	6%	6%
0.15	N° 100			6%	3%	2%	2%	2%
0.075	N° 200			4%	2%	1%	1%	1%

Para el caso específico de materiales combinados no existen normas técnicas nacionales ni americanas que especifiquen límites de gradación, es por esta razón que las siguientes graficas no cuentan con dichos límites.



Gráfica 4. Granulometría material combinado

A pesar de no existir límites definidos por normas técnicas acerca de la gradación de materiales combinados, es fácilmente apreciable que las mezclas presentan una buena gradación, a pesar que la mezcla patrón cuenta con una mayor cantidad de partículas entre los tamaños de 0.6 mm y 4.76 mm, lo que probablemente le dará una mejor manejabilidad al concreto a comparación de las mezclas que presentan presencia de AET.

#### 7.1.2 Masa unitaria (NTC 92, 1995).

Los resultados mostrados a continuación contemplan los resultados de los ensayos de masa unitaria para el agregado ligero, sujetos a la norma técnica colombiana NTC 92 (1995).

Tabla 10. Masa unitaria suelta y apisonada.

	Masa Unitaria Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	Masa Unitaria Apisonada (kg/m <sup>3</sup> )
AET valle de aburra	626	639
AET 1 (Martinez,2010)	1063	1168
AET 2( Martinez,2010)	399	---
NTC 4045	880	---

Basados en los resultados anteriores, y comparando los resultados contra los agregados de (Martínez, 2010) y los agregados ligeros comerciales Aliven de Venezuela, se puede concluir que las AET del valle de aburra se encuentran entre los valores típicos de masa unitaria suelta para un AET, generando un agregado más ligero que el producido anteriormente en Bogotá por dicho grupo de investigación, pero aun con falencias frente a su homólogo en el país vecino. A pesar de esto la NTC 4045 considera un límite máximo con el cual la AET de corona cumple completamente.

### 7.1.3 Densidad y absorción para el componente grueso. (NTC 176, 1995).

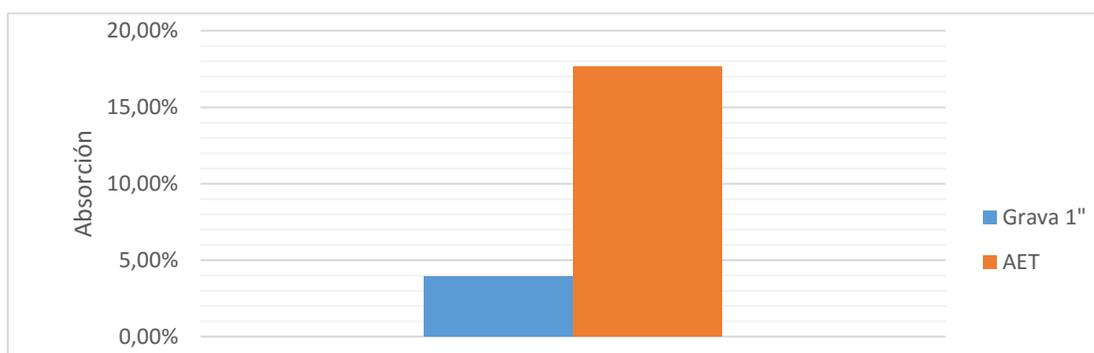
Tabla 11. Densidades y absorción de la AET y la grava de 1"

Densidad y absorción	AET	Grava 1"
Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.65	2.298
Densidad Aparente SSS (g/cm <sup>3</sup> )	1.164	2.389
Densidad Nominal (g/cm <sup>3</sup> )	1.199	2.528
Absorción (%)	17.65	3.96

De los resultados obtenidos en el laboratorio cabe resaltar la importancia de este ensayo, ya que la densidad del agregado ligero, será el componente directamente relacionado con la disminución del peso del concreto, para ver más claro este fenómeno se comparará este resultado frente a la grava de cantera usada en la mezcla patrón, mostrando las ventajas y desventajas de este agregado.

Como se puede apreciar en la Tabla 11, la densidad nominal de la AET es en promedio la mitad que la grava de 1", lo que posteriormente se traducirá en un porcentaje menor en la densidad de frente a resultados este en el concreto.

En la Gráfica 5 se puede observar la diferencia de absorción del agregado convencional y la AET.



Gráfica 5. Comparación entre la absorción de la AET y la grava 1"

En la Gráfica 5 se puede apreciar que la absorción de la grava es de 4.5 veces menor al de la AET.

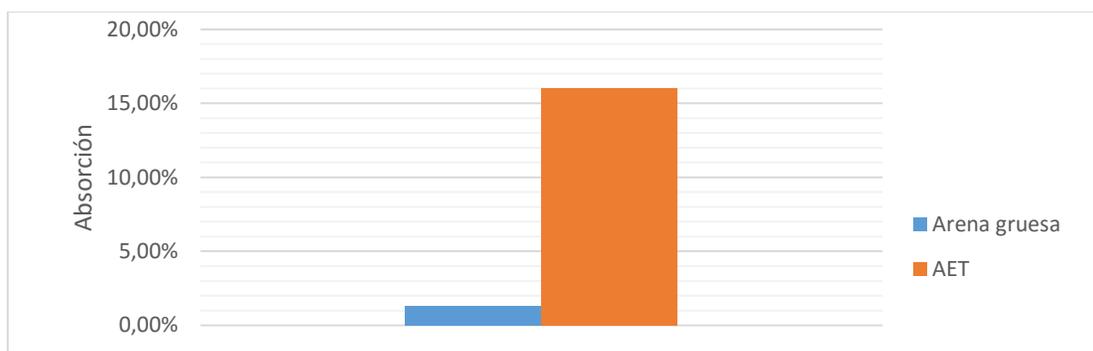
Densidad y absorción para el componente ligero NTC 237.

Tabla 12. Densidades y absorción de la AET y la arena gruesa

Densidad y absorción	AET	Arena Gruesa
Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.913	2.59
Densidad Aparente SSS (g/cm <sup>3</sup> )	0.93	2.62
Densidad Nominal (g/cm <sup>3</sup> )	1.076	2.68
Absorción (%)	16.5	1.3

Al igual que en el caso del componente grueso, en las arenas cabe resaltar la importancia de este ensayo, ya que la densidad del agregado ligero también varía drásticamente frente a la de la arena gruesa, observando mejor este fenómeno en la Gráfica 6.

Al igual que los agregados gruesos, en los finos es totalmente evidente la reducción en las tres densidades medidas, aproximadamente un 63% en promedio, lo que representara grandes repercusiones en la mezcla de concreto que posteriormente se rectificará.



Gráfica 6. Comparación entre la absorción de la AET y la arena gruesa

En cuanto a la absorción de los agregados, es aún más notable la diferencia si se comparan las absorciones de la arena gruesa contra la absorción del componente fino de los agregados ligeros, donde se ve una reducción del 85% de la absorción con respecto al agregado ligero, lo que representa como se mencionó anterior mente una mayor incertidumbre en la relación A/C del concreto hecho en laboratorio.

#### 7.1.4 Caracterización de la arcilla expandida térmicamente.

Como resumen de este capítulo se puede afirmar, que la arcilla expandida térmicamente proveniente del valle del Aburra, en primera medida no es netamente un agregado grueso debido a que cuenta con un 30% de material que pasa por el tamiz #4 en su presentación comercial, es por esto que la gradación de este material no se acomoda a ninguno de los límites establecidos en la NTC 4045 (Agregados ligeros para concreto estructural), a pesar de esto se encontró que los limites que mejor se acomodan a este agregado son los correspondientes a la categoría de agregado grueso de ½". Es por esta razón que al analizar

los datos de masa unitaria suelta y compactada vemos que el aumento no es superior al 3%, debido a que el material cuenta con una cantidad de finos alta que generan pocos vacíos en su acomodación.

Por otro lado y cómo fue posible observar en los ensayos de densidad de ambas fracciones del material (gruesos y finos) la densidad de este agregado, es su característica más representativa ya que es en promedio un 46% y 63% más ligero que sus similares de grava y arena respectivamente. Lo cual repercutirá en varias fracciones de la mezcla del concreto, como lo será su manejabilidad, asentamiento, flotación y densidad en estado fresco y endurecido. En la Tabla 13 se presentara la caracterización del AET:

*Tabla 13. Caracterización del agregado ligero*

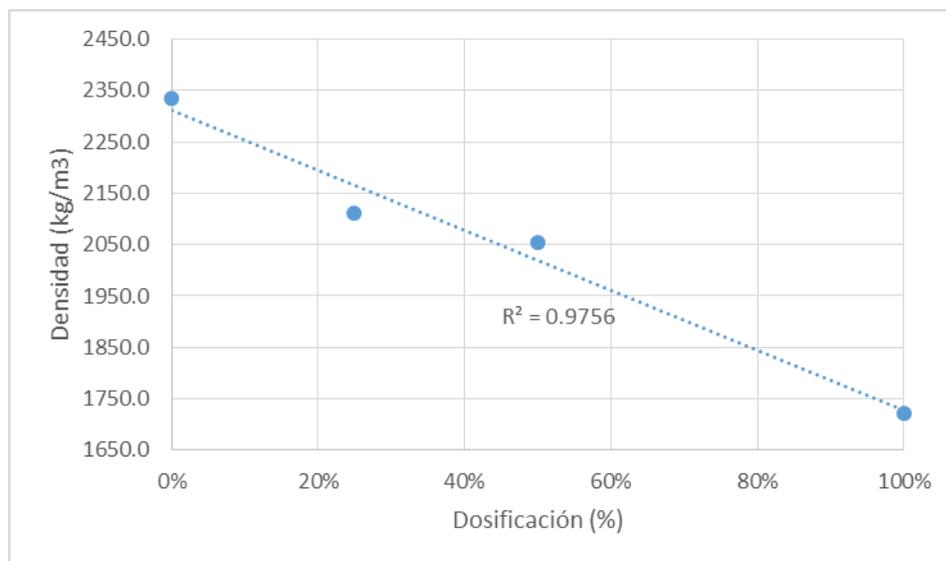
Masa unitaria suelta. (Kg/m <sup>3</sup> )	626
Masa unitaria compactada. (Kg/m <sup>3</sup> )	638
Densidad aparente. (g/cm <sup>3</sup> )	1.65
Densidad aparente SSS. (g/cm <sup>3</sup> )	1.16
Densidad nominal. (g/cm <sup>3</sup> )	1.19
Absorción (%)	17.65%

## 7.2 Determinar las propiedades físicas y mecánicas del concreto estructural aligerado

Para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los concretos producidos mediante la variación de la dosificación de AET, se consideró pertinente someter el concreto a varios ensayos tales como, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, permeabilidad, densidad en estado fresco y endurecido.

En esta sección se muestran los resultados de los ensayos realizados tanto al concreto en estado fresco como al concreto en estado endurecido (probetas de concreto). Cabe resaltar que para el análisis se descartaron los datos que se consideraron atípicos para calcular el promedio en los ensayos. Para determinar los datos atípicos se recurrió al método estadístico, en el cual a partir de la mediana se determina cual es el rango máximo y mínimo aceptable de los datos, con una aceptabilidad del 10%. A continuación se muestran los resultados.

### 7.2.1 Densidad en estado fresco y densidad en estado endurecido



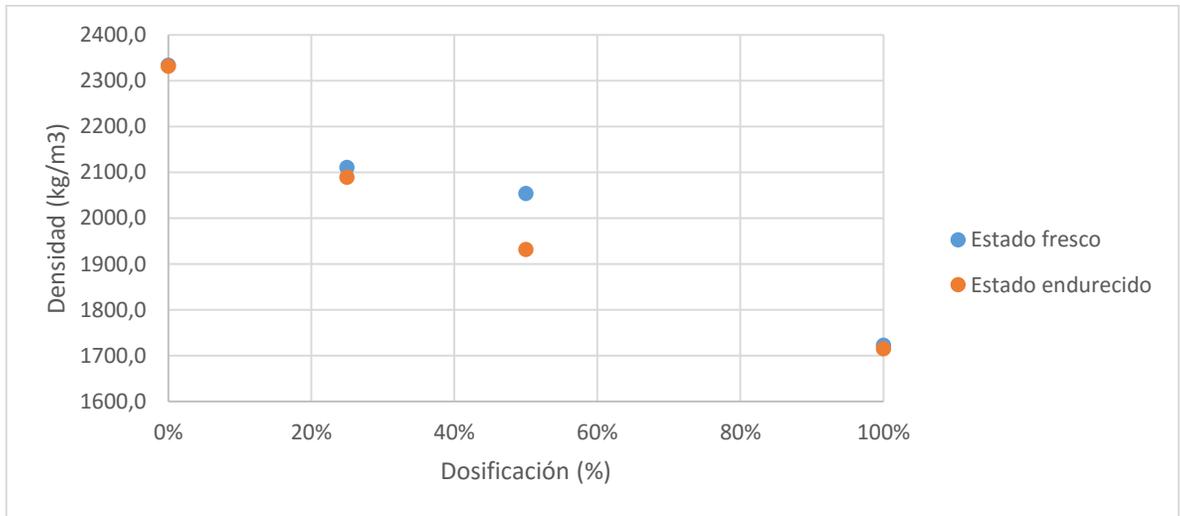
Gráfica 7. Dosificación de AET vs Densidad

En la Gráfica 7 se puede observar que la relación que existe entre la densidad y el porcentaje de reemplazo de agregado ligero es cercana a la lineal.

Como se esperaba, al reemplazar la grava por agregado ligero, la densidad del concreto disminuye, hasta alcanzar con el 100% de reemplazo de la grava una

reducción de la densidad entre el 33% y 38% con respecto al concreto con 0% de reemplazo de la grava.

La densidad de los concretos es inversamente proporcional a la cantidad de agregado ligero que este contenga, es decir que al aumentar el porcentaje de reemplazo de la grava por agregado ligero la densidad del concreto disminuye.

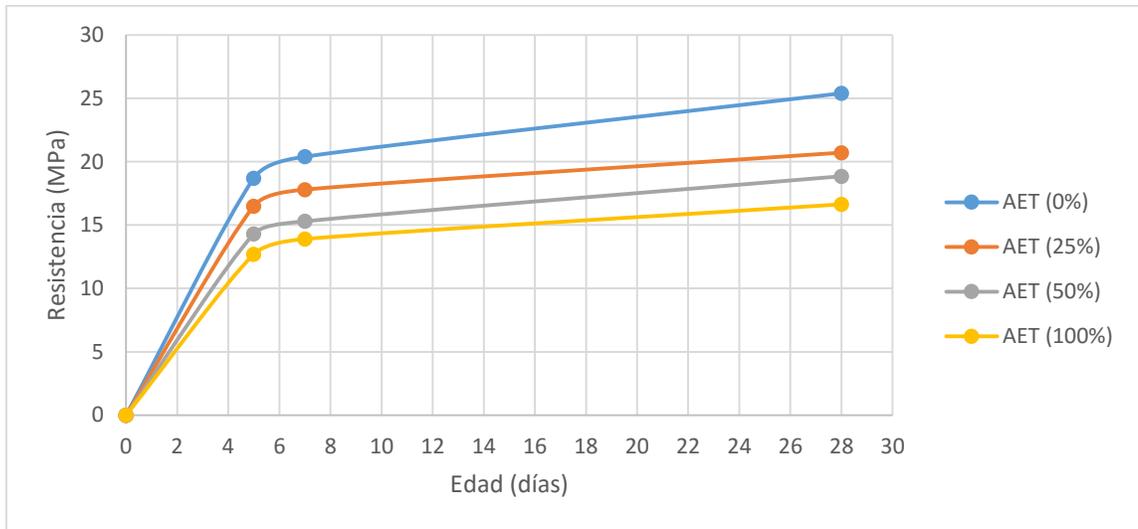


Gráfica 8. Dosificación de AET vs Densidad

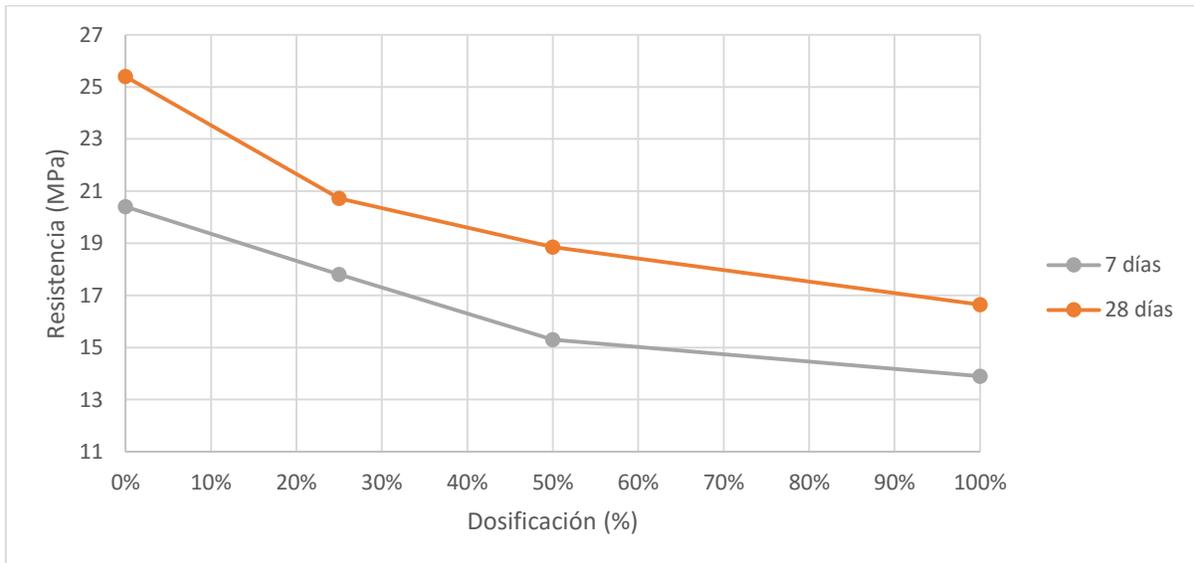
En la Gráfica 8 se puede observar que la densidad en estado fresco y la densidad en estado endurecido son similares.

Resistencia a la compresión.

Para las mezclas realizadas con relación A/C constante de 0.74 se expondrán 2 diferentes tipos de gráficas, con las cuales se pretende caracterizar la resistencia a la compresión del concreto ligero con distintos porcentajes de dosificación de AET.



Gráfica 9. Resistencia vs Días para una relación A/C constante de 0.74



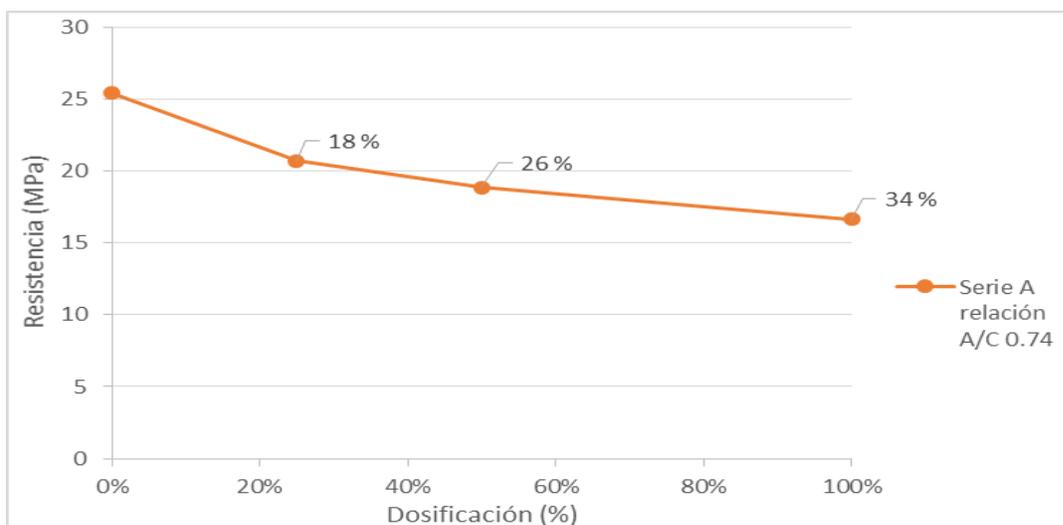
Gráfica 10. Dosificación de AET vs Resistencia para una relación A/C constante de 0.74

En la Gráfica 9 se observa que el comportamiento de las mezclas de concreto con AET para las condiciones del 25% de AET ,50% de AET y el 100% de AET, es el mismo que el del concreto convencional, en el cual la resistencia del concreto incrementa a medida que transcurre el tiempo, especialmente con un buen curado.

Por otro lado se observa en la Gráfica 10 que entre las diferentes edades de las mezclas, la resistencia aumenta de forma constante, es decir que la resistencia que aumenta entre los 7 días y los 28 días para todas las mezclas es similar, tendiendo a un valor promedio de alrededor 4.5 MPa.

Tabla 14. Perdida de resistencia

Dosificación	% de perdida	% de perdida (Moravia, et al, 2010)
AET (25%)	18.4%	---
AET (50%)	25.8%	---
AET (100%)	34.5%	22%



Gráfica 11. Perdida de la resistencia a la compresión

En la Tabla 14, se calculó en porcentaje la perdida que tiene el concreto ligero a medida del incremento en la dosificación de AET, se observa que la perdida que se presenta ante un concreto convencional es bastante alta alcanzado un valor de 35% para el 100% de AET, respecto a una mezcla testigo (0% de AET). En la Gráfica 11, se puede observar el comportamiento que presenta la resistencia a compresión al incrementar la dosificación de AET en la mezcla.

Con respecto a lo encontrado por Moravia et al., (2010), se observa que el agregado usado tenía mejor resistencia, provocando que la pérdida en la resistencia ante un concreto convencional fuera de tan del 22% para el 100% de AET, una cifra igualmente significativa.

Con respecto a la Gráfica 10, se observa que a medida que se aumenta la cantidad de agregado ligero y se disminuye el de la grava, la resistencia del concreto disminuye. Esto se debe a que la resistencia de los agregados ligeros es baja comparada con la de los agregados convencionales.

Así mismo, se puede observar a partir de la Gráfica 10 que solo la mezcla patrón (mezcla 1), caracterizada por no tener AET, alcanzo la resistencia especificada de 24.5 MPa, esto se debe, como se dijo anteriormente, a que los agregados ligeros tiene una resistencia menor que los agregados convencionales, en este caso la grava.

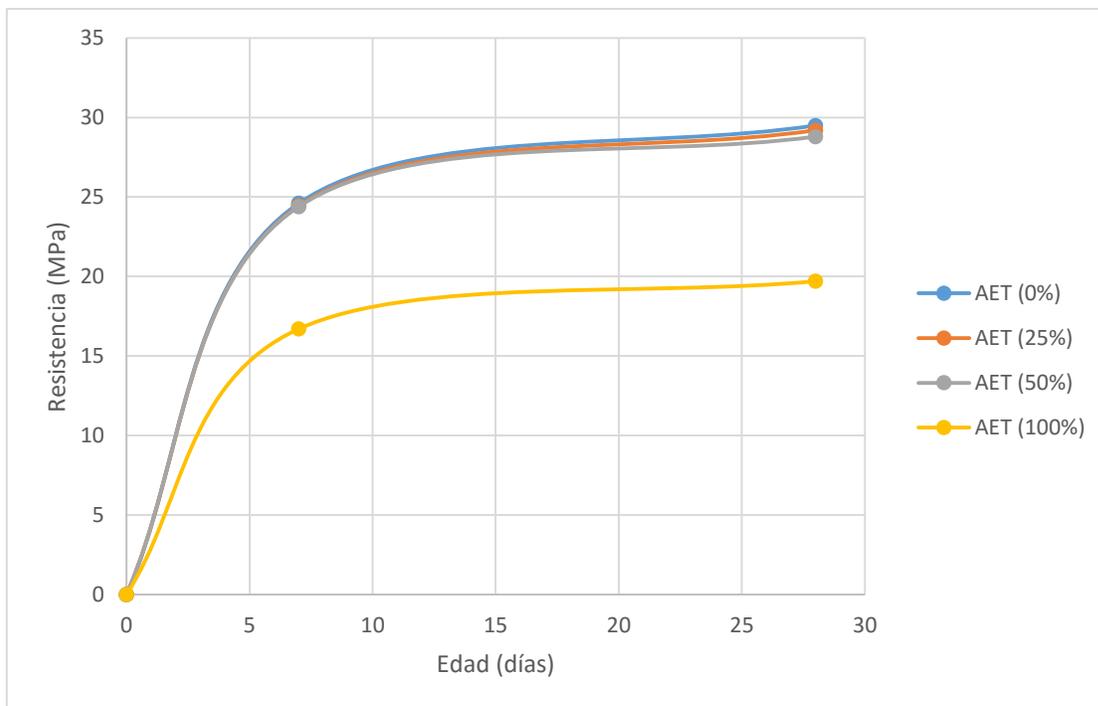
Sin embargo, de acuerdo con la ASTM C330 estándar, para clasificar a un concreto como ligero este debería tener una resistencia a compresión mayor a 17 MPa a los 28 días de edad, el cual se debe determinar por la falla a compresión axial de los especímenes cilíndricos, requisito que cumplieron las mezclas realizadas, propiedad que todas las mezclas cumplieron.

Con el fin de poder lograr concretos con la misma resistencia se procedió a realizar ajustes a la relación A/C. A continuación se muestra los resultados de las mezclas hechas con diferente relación A/C:

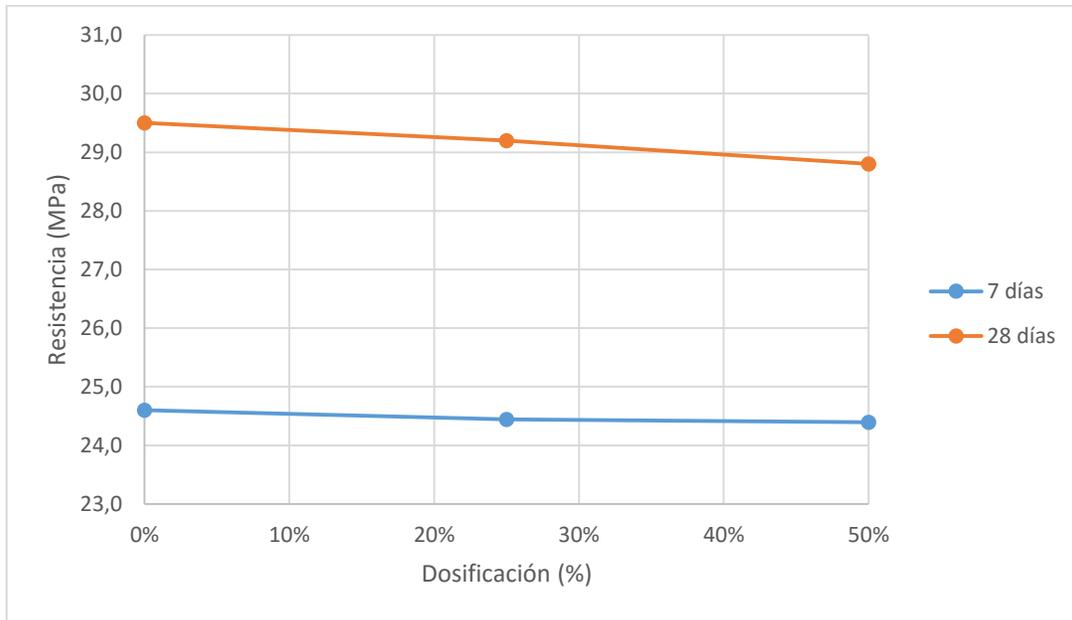
*Tabla 15. Mezclas con diferente relación A/C*

	Relación A/C
AET (0%)	0.7
AET (25%)	0.63
AET (50%)	0.616
AET (100%)	0.574

La idea de disminuir la relación A/C dependiendo del porcentaje de AET, fue con el objetivo de que el comportamiento de las mezclas de concreto hechas con AET, no se vea afectada por la presencia de este, sino que sea el mismo comportamiento que el del concreto convencional, sobre la resistencia, en el cual la resistencia del concreto incrementa a medida que transcurre el tiempo, especialmente con un buen curado. En la Gráfica 12 se aprecia que se obtuvo lo esperado.



Gráfica 12. Resistencia vs Edad para una resistencia constante de 24 MPa.



Gráfica 13. Dosificación de AET vs Resistencia para una resistencia constante de 24.5 MPa.

Con respecto a la Gráfica 13, se observa que al haber variado la relación A/C se obtuvo resistencias similares entre las mezclas, a excepción de la mezcla con el 100% de AET, a pesar del efecto negativo a la resistencia que se tiene con el incremento de la cantidad de AET en el concreto y la consecuente disminución de la grava. Esto se debe a que como en los concretos convencionales, la disminución de la relación A/C en las mezclas de concreto, aumenta la resistencia de estas. A excepción de la mezcla con el 100% de AET, todas las mezclas alcanzaron la resistencia especificada de 24.5 MPa.

A continuación se procederá a mostrar imágenes de la falla de los cilindros sometidos al ensayo de resistencia a compresión.



*Ilustración 7. Falla de la mezcla testigo sometida al ensayo de resistencia a compresión.*



*Ilustración 8. Falla de la mezcla con 25% de reemplazo de AET sometida al ensayo de resistencia a compresión.*



*Ilustración 9. Falla de la mezcla con 50% de reemplazo de AET sometida al ensayo de resistencia a compresión.*



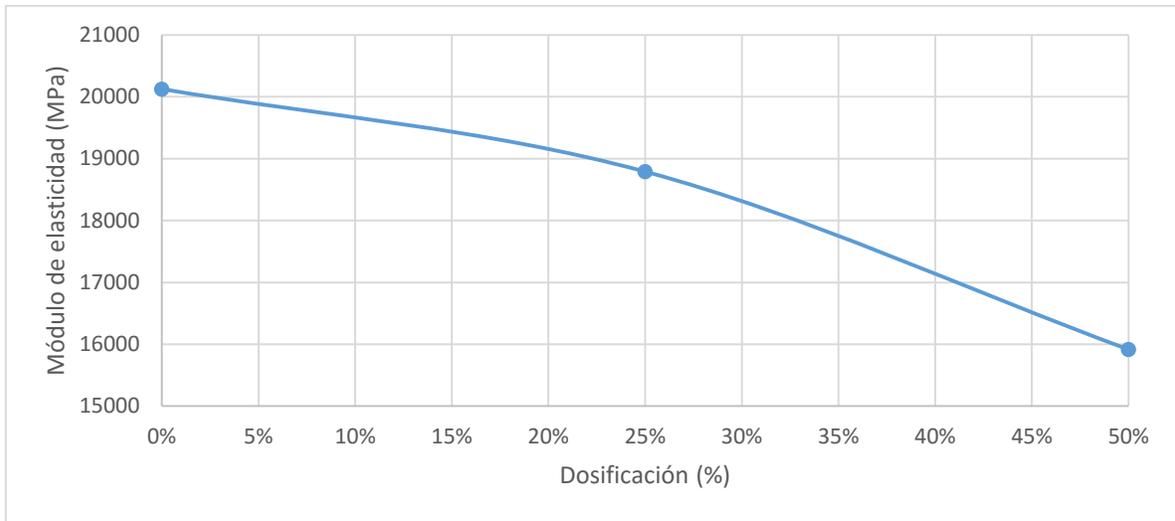
*Ilustración 10. Falla de la mezcla con 100% de reemplazo de AET sometida al ensayo de resistencia a compresión.*

Se puede observar en la Ilustración 8, Ilustración 9 y la Ilustración 10 que las fallas de los cilindros sometidos al ensayo de resistencia a compresión, para los distintos porcentajes de dosificación del 25%, 50% y 100% de AET, son similares a las de la mezcla testigo (Ilustración 7), siendo esta una falla definida en la NTC 673 como transversal.

### 7.2.2 Módulo de elasticidad

*Tabla 16. Mezclas con resistencia constante de 24.5 MPa*

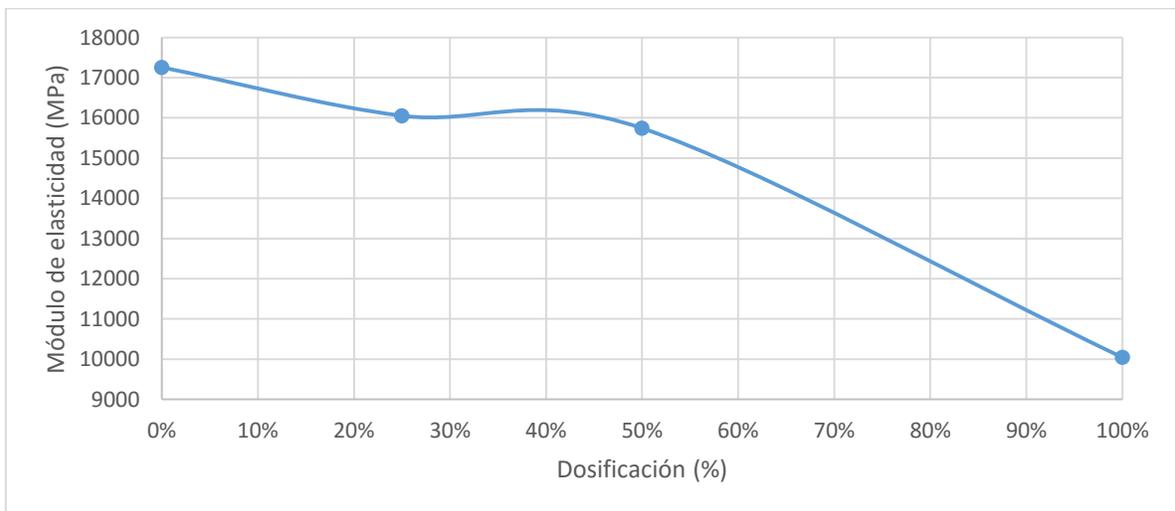
Mezcla	Dosificación AET (%)	Módulo de elasticidad (MPa)
1	0%	20128
2	25%	18792
3	50%	15916



Gráfica 14. Dosificación vs Módulo de elasticidad para una resistencia constante de 24 MPa

Tabla 17. Mezclas con relación A/C constante de 0.74

Mezcla	Dosificación AET (%)	Módulo de elasticidad (MPa)
1	0%	17257
2	25%	16053
3	50%	15742
4	100%	10043



Gráfica 15. Dosificación vs Módulo de elasticidad para una relación A/C constante de 0.74

Podemos observar en la Gráfica 14 y en la Gráfica 15 que el comportamiento del módulo de la elasticidad con respecto a la dosificación tiende a ser como en la resistencia y en la densidad, que a medida que aumenta el porcentaje de AET presente en la mezcla disminuye el valor del módulo de elasticidad.

*Tabla 18. Pérdida del módulo de elasticidad para una resistencia de 24.5 Mpa*

Dosificación	% de pérdida
AET (25%)	6.6%
AET (50%)	20.9%

Así mismo en la Gráfica 14 y en la Gráfica 15 se puede observar que como se encontró en la literatura el módulo de elasticidad de los concretos ligeros es generalmente entre un 20% a 50% más bajo que el del concreto convencional (Martínez, 2010). Así mismo se observa en la Tabla 18 que en este caso la pérdida del módulo de elasticidad es de alrededor del 7% para un reemplazo del 25% de grava por AET y de un 21% para un reemplazo del 50% de grava por AET, para concretos ligeros con la misma resistencia.

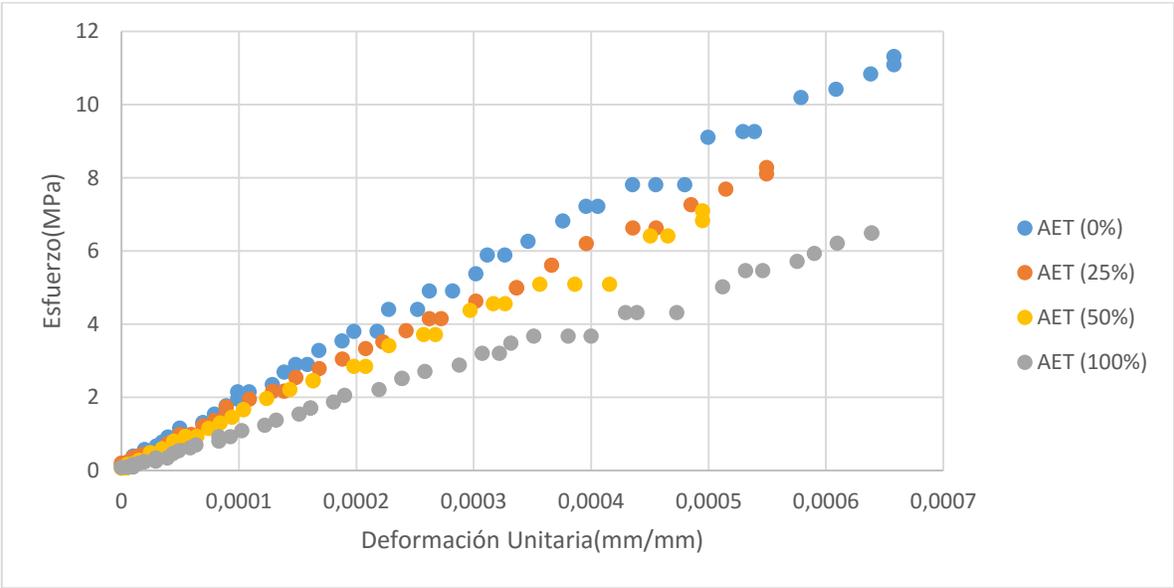
*Tabla 19. Disminución de módulo de elasticidad para concretos con diferente resistencia a 28 días con respecto a la mezcla testigo*

Dosificación	% de pérdida	% de pérdida (Angelin, <i>et al</i> , 2010)
AET (25%)	7.0%	---
AET (50%)	8.8%	40%
AET (100%)	41.8%	64%

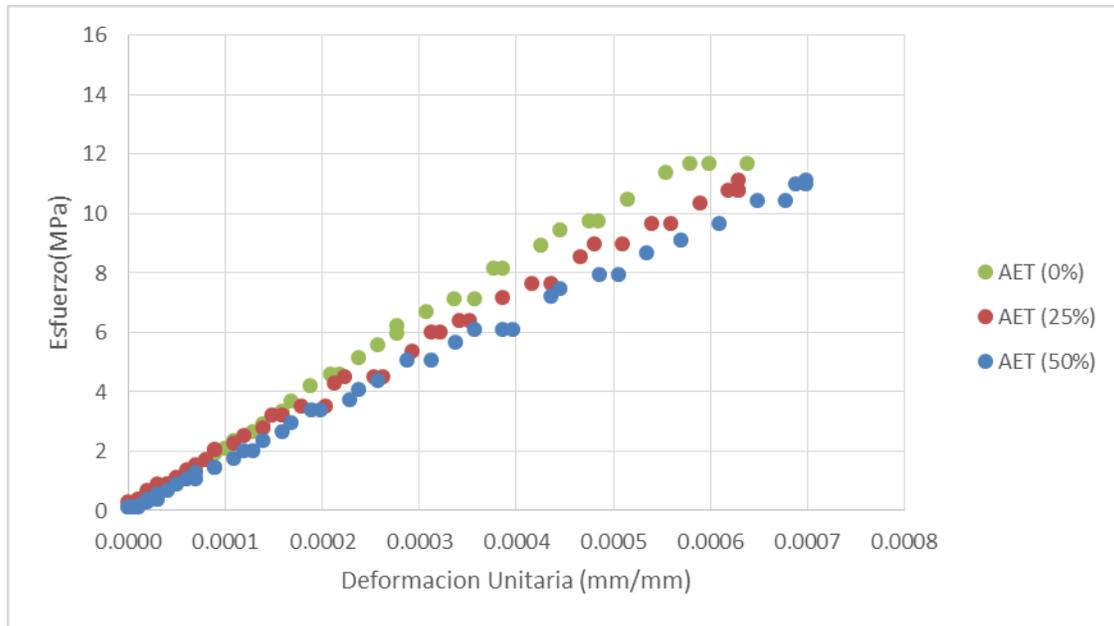
En la Tabla 19, se observa que para concretos que no tienen la misma resistencia, la pérdida del módulo de elasticidad se incrementa de valor por efecto de la resistencia y que es de alrededor del 7% para un reemplazo del 25% de grava por AET, de 8.8 % para un reemplazo del 50% de grava por AET y del 42% para un reemplazo del 100% de grava por AET. Podemos observar, que en comparación con la investigación hecha por Angelin, *et al.*, (2010)

los concretos obtenidos con el AET del valle de aburra presentan menor pérdida de módulo de elasticidad, lo que implica que presentan un buen comportamiento en esta propiedad.

Lo que nos indica un menor módulo de elasticidad del concreto ligero respecto al concreto convencional, es la capacidad de este para absorber las pequeñas deformaciones, como las de contracción, lo cual reduce los esfuerzos internos y la microfisuración, aumentando la vida de servicio del concreto ligero. (Moravia, *et al.*, 2010)



Gráfica 16. Deformación unitario vs Esfuerzo para una relación A/C constante de 0.74



Gráfica 17. Deformación unitaria vs Esfuerzo para una resistencia constante de 24 MPa

En las Gráfica 16 y Gráfica 17 se observa que para una misma relación A/C la mezcla con mayor presencia de AET, presenta menor resistencia corroborando los resultados obtenidos en el capítulo 1.2.2., también es posible observar que la deformación unitaria máxima es muy parecida a la del concreto patrón con una disminución de la resistencia a la compresión cercana al 45%, por ende el módulo de elasticidad de los concretos ligeros es una propiedad que se ve directamente reducida por la presencia de AET.

Así mismo, se procedió a calcular la constante que determina el comportamiento entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad, como se observa en la Tabla 20. Es importante tener en cuenta, que del módulo de elasticidad solo se realizó un ensayo por cada dosificación de AET.

Tabla 20. Constante que relaciona el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión

Dosificación de AET	f'c (MPa)	E (MPa)	Constante
0%	29.5	20128	3705.86518
25%	29.2	18792	3477.61562
50%	28.8	15916	2965.77149

### 7.2.3 Permeabilidad. (NTC 4483)

El ensayo de permeabilidad se realizó por presión de agua. Para la toma y análisis de resultados se optó por comparar dos parámetros, el primero es el nivel de penetración de agua en los especímenes, para medir este parámetro fue necesario romper los cilindros transversalmente y medir que tanto penetra el agua dentro de ellos. El segundo parámetro que se tuvo en cuenta para la medición de la permeabilidad fue el cálculo de la masa de agua que entro a los especímenes, este cálculo se realizó mediante la diferencia de la masa inicial y final de las muestras, se consideró correcto este cálculo debido a que los cilindros se encontraban totalmente impermeabilizados y sellados por todas sus caras.

#### 3.3.2.4 Permeabilidad por penetración.

- Especimen patrón con 0% de dosificación de AET.



Ilustración 11. Penetración espécimen con 0% de AET.

En la Ilustración 11, se observa el espécimen patrón que corresponde a una mezcla de concreto convencional, es posible observar que la penetración de agua después de 72 horas de exposición y a una presión de 4.2 bar. La película de agua logro atravesar aproximadamente 3 cm de la muestra de manera uniforme. Lo que representa una permeabilidad normal y aceptable para altos niveles de exposición según la NTC 4483 (Tabla 21) y la norma técnica Española UNE 83.309:90.

*Tabla 21. Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad*

Determinación	Unidades	Permeabilidad		
		Baja	Media	Alta
Coficiente de permeabilidad al agua	m/s	$<10^{-12}$	$10^{-12}$ a $10^{-10}$	$>10^{-10}$
Profundidad de penetración	mm	<30	30 a 60	>60

➤ Especimen con 25% de dosificación de AET.



*Ilustración 12. Penetración espécimen con 25% de AET.*

En la Ilustración 12, se observa en el caso del espécimen con reemplazo del 25% de AET, es posible observar que el comportamiento de la penetración de agua no fue uniforme como en el caso anterior, esto pudo ser originado por varios factores, tales como la compactación de las muestras en su estado fresco, lo que pudo ocasionar que la muestra contara con secciones más porosas y menos densas las cuales representaron una mayor facilidad para el flujo de

agua en esos sectores, otra posible causa de este fenómeno pudo ser la distribución de la AET en la muestra, la cual permitió la el paso de agua alrededor de estas.

Para este espécimen en particular, no sería fácil determinar si tiene una buena o mala permeabilidad debido a la distribución del agua al interior de la muestra.

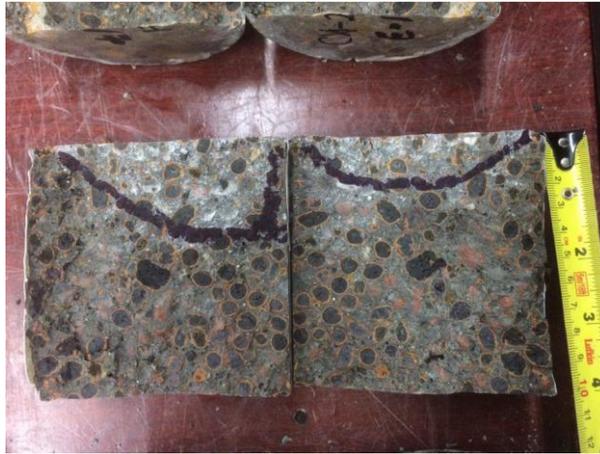
- Especimen con 50% de dosificación de AET.



*Ilustración 13. Penetración espécimen con 50% de AET.*

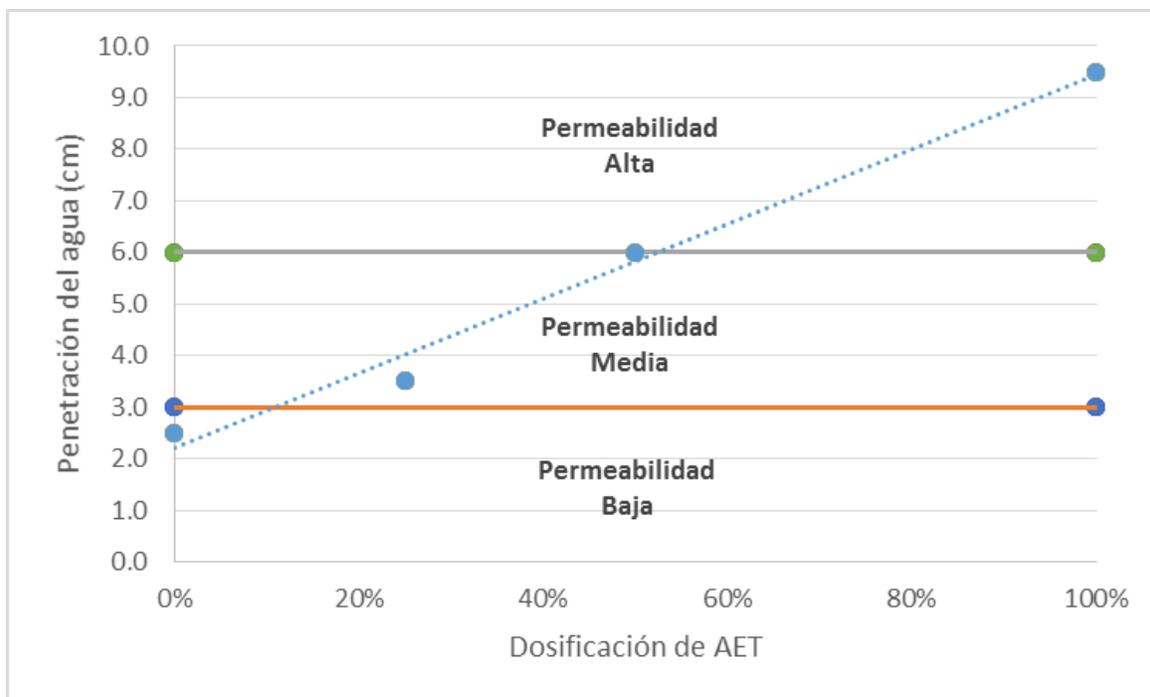
En la Ilustración 13, se observa el caso de 50% de dosificación, se da un fenómeno similar al de 25% y es que se generan canales de flujo alrededor de las AET, como se puede observar en la figura, en este caso el nivel de penetración del agua es mayor que en los dos casos anteriores, esto se debe a que la presencia de AE es mayor y al parecer estos agregados son los responsables de los altos niveles de permeabilidad.

- Especimen con 100% de dosificación de AET.



*Ilustración 14. Penetración espécimen con 100% de AET.*

En la Ilustración 14, se observa el caso del concreto hecho en su totalidad con AET, es totalmente evidente que el agua penetró alrededor del 90% de la muestra, lo que reafirma los resultados obtenidos en los ensayos anteriores, adicionalmente este resultado arroja como respuesta que este agregado afecta directamente no solo la resistencia si no también la durabilidad del concreto, que para ambos casos sus efectos son negativos y hacen que sean menos competitivos frente a sus símiles de peso normal.



Gráfica 18. Dosificación de AET vs profundidad de penetración

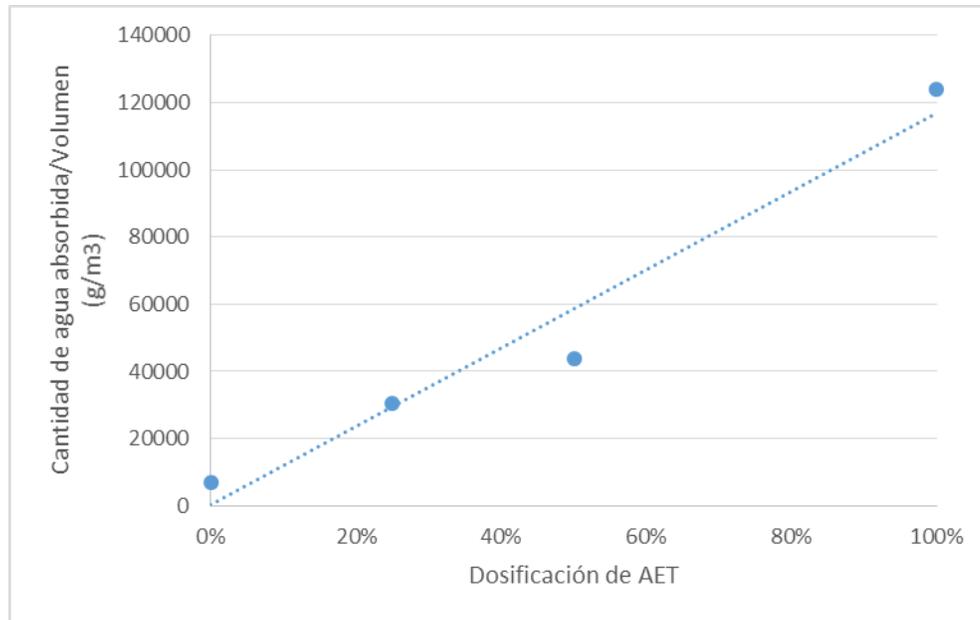
### 3.3.2.5 Permeabilidad por diferencia de masas.

Los resultados obtenidos mediante este método se organizaron en la siguiente tabla:

Tabla 22. Peso vs Dosificación para el ensayo de permeabilidad

Especímenes Permeabilidad								
	Dosificación (%)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Altura (m)	Diametro (m)	Volumen (m)	$\Delta$ de peso (g)	$\Delta$ de peso/Volumen (g/m <sup>3</sup> )
1	0%	1906	1912	0.103	0.103	0.00085725	6	6999
2	25%	1605	1630	0.102	0.101	0.00081831	25	30551
3	50%	1542	1579	0.104	0.102	0.00084541	37	43766
4	100%	1396	1500	0.103	0.102	0.0008397	104	123854

Como se observa en la Tabla 22, existe una relación directa entre la cantidad de agregado ligero utilizado en las muestras y la cantidad de agua que entra en estas, corroborando los resultados de penetración de agua.



*Gráfica 19. Dosificación vs Cantidad de agua*

De los resultados anteriores se puede concluir fácilmente que el aumento en la dosificación de AET conlleva a valores de permeabilidad más altos, los cuales se traducen en concretos menos durables y con pasta de cemento más porosa.

También es posible afirmar que en los especímenes 2 y 3, se observa la formación de meniscos o caminos de agua en los extremos debido a la ubicación de la AET (Ilustración 12, Ilustración 13 e Ilustración 14), la cual posiblemente se acomodó a los extremos de los cilindros debido a que en el proceso de compactación y varillaje, las partículas de menor peso tienden a subir y acomodarse en los bordes de la muestra, mientras que el material grueso queda en las zonas centrales.

#### 7.2.4 Características del concreto ligero estructural.

Como resumen de este capítulo se puede afirmar, que con el concreto ligero estructural elaborado con AET proveniente del valle de aburra, se pueden alcanzar densidades de 1700

(Kg/m<sup>3</sup>) para el caso del 100% de dosificación de dicho agregado, a pesar de esta baja densidad el mismo concreto logra alcanzar resistencias de 17MPa, lo suficiente para clasificar como concreto ligero estructural según la definición de la NSR-10.

En cuanto al módulo de elasticidad se puede observar una reducción cercana al 40% si se comparan los casos del 0% y 100% de dosificación respectivamente, es decir que el agregado ligero AET, no solo afecta directamente la densidad del concreto, también su resistencia y módulo de elasticidad de forma negativa.

Los resultados sobre la permeabilidad del concreto ligero muestran que la durabilidad de estos no es la deseable para concretos ubicados a una alta exposición atmosférica, ya que a medida que se aumenta el porcentaje de AET, el volumen de agua que penetra el concreto es mayor.

*Tabla 23. Tabla resumen caracterización del concreto ligero*

	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Permeabilidad (NTC 4483)
0% de dosificación A/C:0.74	2331.6	25.4	17257	Baja
25% de dosificación A/C:0.74	3089.6	20.7	16053	Media
50% de dosificación A/C:0.74	1932.1	18.9	15742	Media
100% de dosificación A/C:0.74	1715.5	16.9	10043	Alta
0% de dosificación A/C:0.7	2293.8	29.5	20128	Baja
25% de dosificación A/C:0.63	2080.4	29.2	18792	Media
50% de dosificación A/C:0.616	1935.9	28.8	15916	Media

### 7.3 Identificación de los beneficios del uso de concretos ligeros en una estructura Aporticada.

Para identificar los beneficios del uso de los concretos ligeros en una estructura aporticada, usamos como herramienta de diseño y soporte para nuestros resultados SAP2000, con el fin de identificar dichos beneficios a la luz de un modelo numérico estructural.

Para el análisis de resultados, se seleccionaron 3 concretos producto de las pruebas realizadas en los apartados anteriores, con el fin de modelar los resultados obtenidos en el trabajo de investigación y así mismo confrontar los resultados entre ellos.

*Tabla 24. Datos de entrada para la modelación en SAP 2000*

Dosificación	Relacion A/C	f'c (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Densidad (kg/m3)
AET (25%)	0.7	28	20128	2469
AET (50%)	0.63	28	18792	2253
AET (100%)	0.616	28	15916	2113

Para brindar mayor claridad en las gráficas se optó usar como nomenclatura para las mezclas realizadas con diferente relación A/C y resistencias similares la siguiente nomenclatura:

SERIE B			
Concreto	Dosificación (%)	Relación A/C	F'c (MPa)
B 0	0%	0.70	29.5
B 25	25%	0.63	29.2
B 50	50%	0.62	28.8
B 100	100%	0.57	19.4

*Ilustración 15. Descripción mezcla de concreto con resistencia de 28 MPa*

### 7.3.1 Análisis del peso muerto de la estructura.

La siguiente Tabla 25 de resultados muestra la sumatoria de las reacciones en la base para la misma estructura, variando el tipo de concreto modelado y 4 casos de carga distintos que involucran únicamente carga muerta y carga viva.

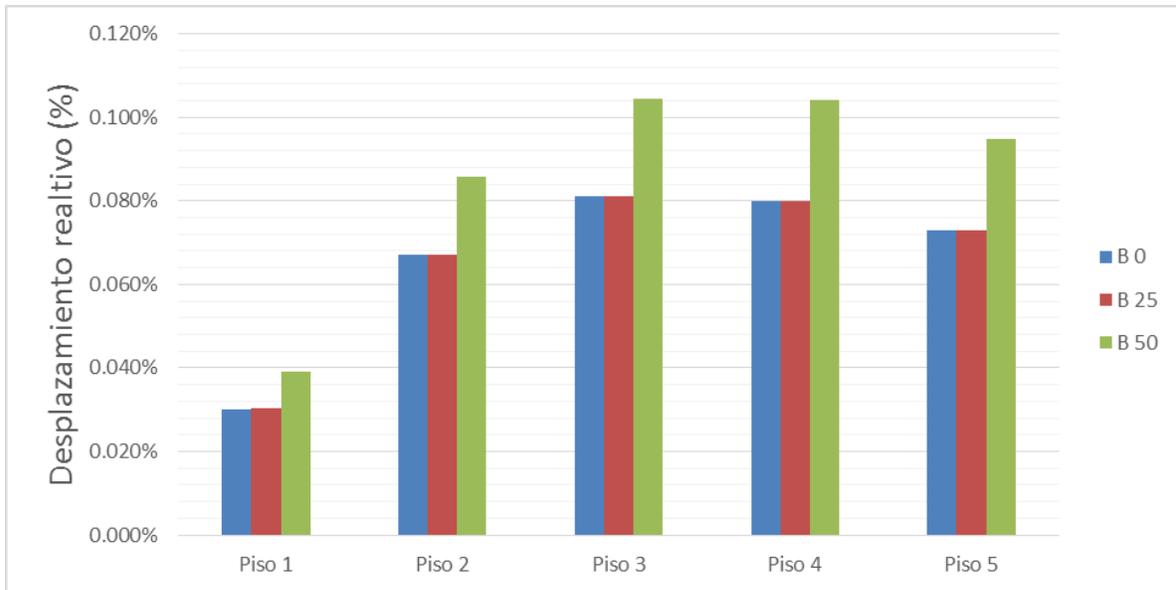
Tabla 25. Peso muerto de la estructura aporricada

Peso Muerto SAP2000			
Dosificación	0%	25%	50%
1.2D+1.0L (Ton)	5755.3	5470.9	5278.2
1.2D+1.6L (B.2.4-2) (Ton)	6105.2	5820.9	5628.1
1.4D (Ton)	6034.1	5702.4	5477.5
DEAD (Ton)	4310.1	4073.1	3912.5

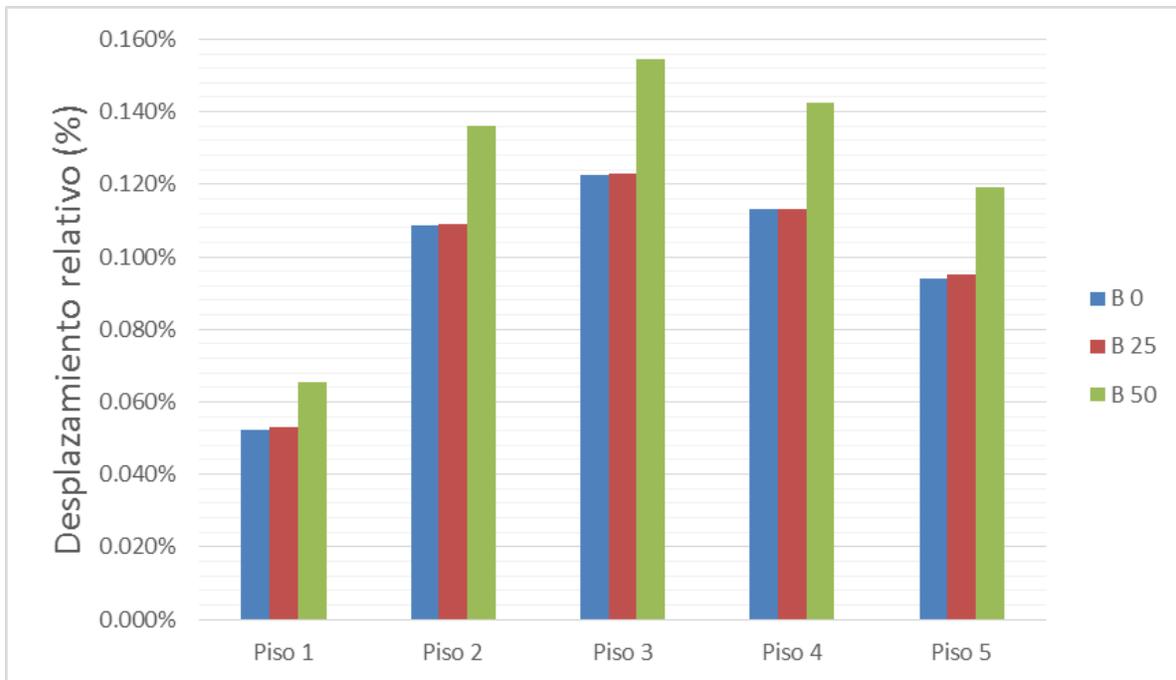
Basados en la Tabla 25, podemos apreciar como varían las reacciones en la base para los distintos tipos de concreto, ahorrando hasta 556.7 toneladas para el caso de carga (1.4 D) si se compara el concreto con 0% de dosificación contra el 50% de dosificación. También se puede apreciar para el caso de carga muerta (DEAD) que la disminución del peso expresada en (%) con respecto a la muestra patrón se traduce en un 5% y 10 % respectivamente para las mezclas de 25% y 50% de dosificación de AET.

### 7.3.2 Análisis variación de la deriva.

Para comparar la diferencia entre las derivas de los tres modelos, estos se sometieron al mismo sismo (Ccorp, 2010) el cual se registró en el municipio de los santos, Santander a 160 Km de profundidad con una magnitud de 6.4 en la escala de Richter. Obteniendo los siguientes resultados.



Gráfica 20. Deriva en X vs Piso.



Gráfica 21. Deriva en Y vs Piso

Basados en los resultados anteriores, se puede observar que la magnitud del sismo estudiado no exige la estructura a niveles de derivas cercanos al 1% permitidos por la NSR-10, por otro lado el objetivo real de este subcapítulo es estudiar la variación de las derivas ocasionadas

por el cambio de material en la estructura, para lo cual el sismo (Ccorp, 2010) nos permite analizar a cabalidad dicho ítem.

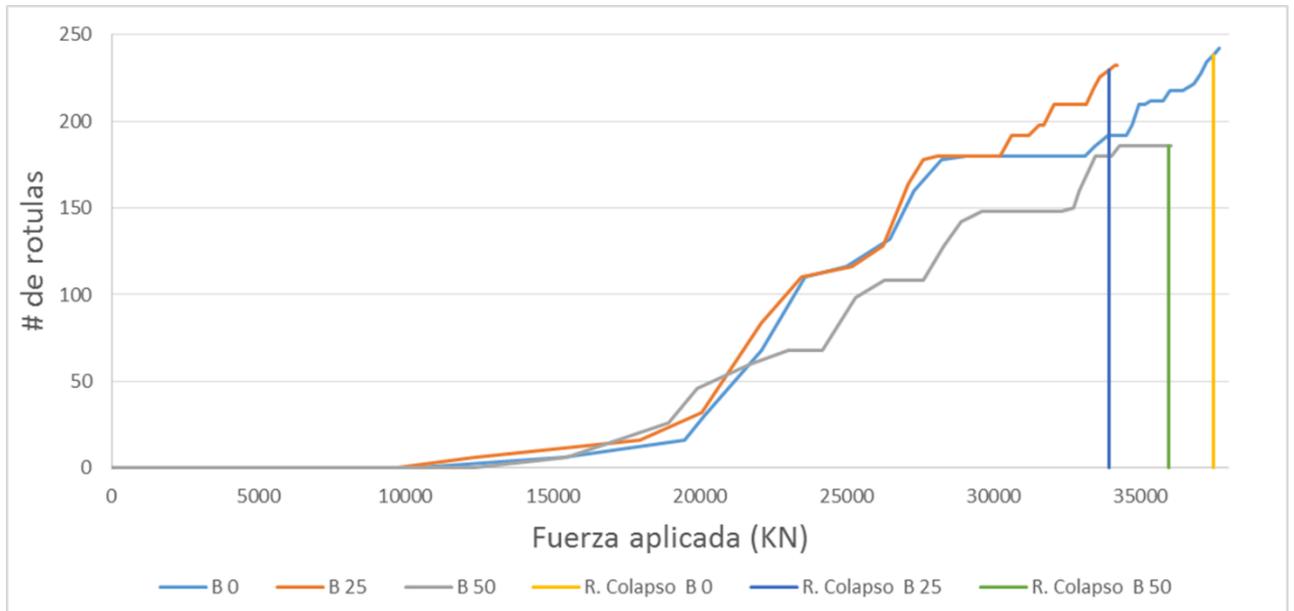
La Gráfica 20 y la Gráfica 21 muestran que en ambas direcciones las derivas son mayores para el edificio modelado con el concreto 3, lo que se traduce en que ese material representa desventajas en cuanto a sus capacidades mecánicas.

Analizando los resultados es posible observar que las derivas que representa la modelación para el 50% de AET son en promedio un 21.55% mayores a las derivas del concreto patrón, y que también la diferencia de derivas entre el uso del concreto 2 contra el concreto 1 no representa más allá de un 5% de variación.

Es pertinente mencionar que el concreto ligero con el 50% de AET cuenta con el menor módulo de elasticidad de los 3 concretos modelados, adicionalmente que este modelo cuenta con la menor carga muerta, lo que significa que a pesar de tener buenos resultados en cuanto a cargas muertas se refiere, el cambio en el módulo de elasticidad representa una afectación mayor que los beneficios mencionados anteriormente.

### 7.3.3 Análisis PUSHOVER.

El análisis de pushover se realizó con el fin de estudiar el comportamiento de las tres estructuras al ser sometidas a un desplazamiento de 60 cm en la cubierta, y de esta forma identificar como varían los estados de servicio de cada uno de los elementos estructurales a medida que este desplazamiento incrementa.



Gráfica 22. Fuerza aplicada vs Cantidad de rótulas

Tabla 26. Desplazamiento de colapso para cada dosificación

Modelo	B 0	B 25	B 50
Desplazamiento (cm)	36.7	24.2	35.3

En la Gráfica 22, es posible observar varios fenómenos tales como:

- El modelo hecho con el concreto 3 es aquel que presenta menor número de elementos estructurales afectados.
- El edificio modelado con el concreto 1, es el que presenta mayor tolerancia a la fuerza horizontal antes de presentar colapso en alguno de sus elementos estructurales.
- El número de elementos estructurales afectados entre el modelo 1 y 2 varían en tan solo 2 elementos.
- El modelo con mejor comportamiento dinámico, según el análisis de pushover es el modelo con el concreto 1, debido a que presenta colapso de sus elementos estructurales a mayor desplazamiento horizontal que los otros dos modelos.

Por otro lado para el análisis pushover se tuvo en cuenta el punto de desempeño de cada uno de los edificios frente al sismo (Ccorp, 2010), donde se analizaron cortantes, desplazamientos, periodos y amortiguamientos para cada estructura obteniendo los siguientes resultados.

*Tabla 27. Punto de desempeño*

Punto de desempeño			
Modelo	B 0	B 25	B 50
Cortante (KN)	23647.160	23452.219	22490.490
Desplazamiento (M)	0.056	0.056	0.060
T efectivo (S)	0.563	0.550	0.565
B efectivo (%)	16.6	15.4	13.8

Basados en la Tabla 27, se puede concluir que la estructura que mejor se comportó ante este sismo para el punto de desempeño, fue la estructura modelada con el concreto 3, debido a que si se tiene en cuenta que el amortiguamiento natural del concreto es de un 5%, esta fue la que menor amortiguamiento de la estructura presentó con aproximadamente un 9%. (ATC40, 1996).

Donde podemos definir el punto de desempeño como el punto de la edificación en el cual debido a las fuerzas y desplazamientos de empiezan a presentar rotulas plásticas.

#### 7.3.4 Fuerzas y deflexiones.

Para el siguiente ítem se tomó la viga y la columna que presentaban los mayores esfuerzos en la edificación, con el fin de hacer el análisis máximo de los elementos.

*Tabla 28. Fuerzas y deflexiones para una viga del modelo*

VIGA			
	Cortante (KN)	Momento( KN*m)	Deflexiones (m)
B 0	398.257	597.3863	0.005192
B 25	387.109	580.6634	0.005406
B 50	379.548	569.3231	0.006258
0% - 25%	11.148	16.7229	-0.000214
25% - 50%	7.561	11.3403	-0.000852
0% - 50%	18.709	28.0632	-0.001066

En la Tabla 28 puede observar que la viga seleccionada del modelo presenta menor fuerza cortante y momento a medida que el modelo presenta un concreto ligero con mayor dosificación de AET, esto es debido a la disminución del peso propio que presentan los elementos por el cambio de densidad, al mantenerse una misma resistencia.

Por otro lado en el caso de las deformaciones se ve un aumento a medida que el modelo presenta un concreto ligero con mayor dosificación de AET y esto se debe a que el módulo de elasticidad es menor a mayor dosificación de AET, lo que implica mayores deformaciones con igual esfuerzo.

*Tabla 29. Fuerzas y deflexiones para una columna del modelo*

COLUMNA			
	Axial (KN)	Momento( KN*m)	Deflexiones (m)
B 0	4305.0	10.5	0.00000191
B 25	4132.5	9.9	0.00000200
B 50	4015.7	22.2	0.00000360
0% - 25%	172.5	0.6	-0.00000090
25% - 50%	116.8	-12.3	-0.000001596
0% - 50%	289.3	-11.8	-0.000001686

En el caso de la columna analizada se observa en la Tabla 29 que la carga axial disminuye, mientras que la deformación aumenta a medida que el modelo usado presenta un concreto ligero con mayor dosificación de AET. Con respecto al momento, se ve una disminución en el modelo del 25% de AET con respecto al modelo con el 0% de AET, mientras que el

momento en el modelo del 50% de AET aumenta con respecto tanto al modelo del 0% de AET y el del 25% de AET.

La carga axial disminuye debido a la reducción del peso propio de los elementos, mientras que la deformación aumenta debido a la disminución del módulo elástico con el incremento de la dosificación del AET.

El comportamiento de los momentos se puede explicar a que a pesar de la disminución de la carga muerta, el módulo de elasticidad también tiene una reducción significativa provocando un aumento en el momento del modelo de 50% de AET.

### 3.3.2.6 Reducción en el volumen de concreto.

Al ser menores las fuerzas se podría hablar de reducir las secciones de los elementos estructurales, es importante aclarar por qué el siguiente análisis contiene limitaciones tales como el análisis del acero.

*Tabla 30. Volumen de concreto en las columnas de los diferentes modelos*

Volumen 0% (m3)	90	86.4	126	84
Volumen 25% (m3)	86.4	82.944	120.96	80.64
Volumen 50% (m3)	83.7	80.352	117.18	78.12

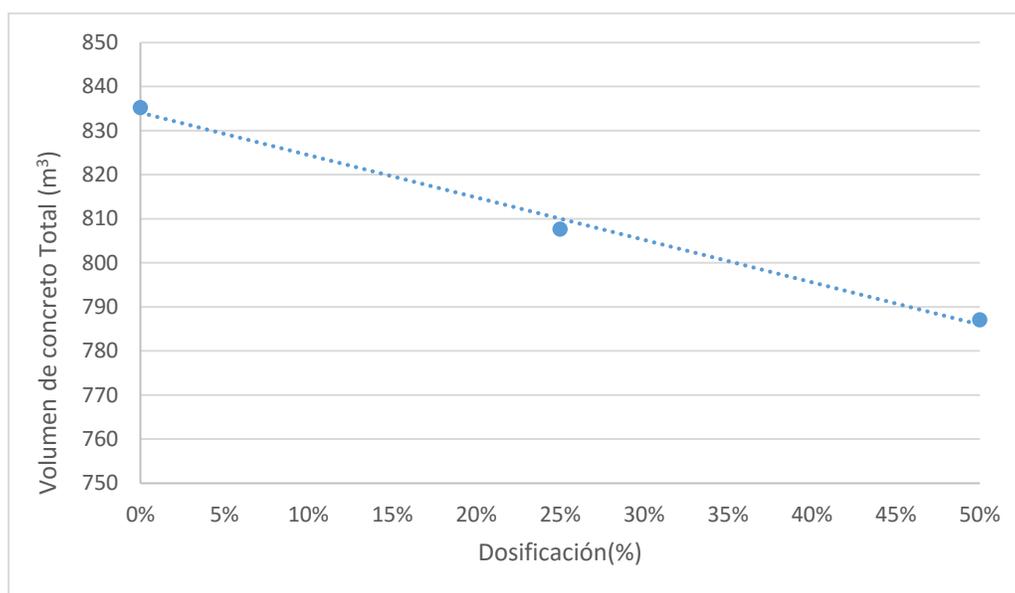
*Tabla 31. Volumen de concreto en las vigas de los diferentes modelos*

Volumen 0% (m3)	252	196.875
Volumen 25% (m3)	245.196	191.559375
Volumen 50% (m3)	240.156	187.621875

Se puede observar en la Tabla 30 y en la Tabla 31, el volumen de concreto tanto para las columnas como para las vigas se puede reducir debido a la disminución del peso propio, pero en el caso de las columnas la cantidad de concreto reducido es levemente mayor al de las vigas, debido a que las columnas no solo se someten a su carga propia, sino que también

soportan las cargas propias provenientes de otros elementos, mientras que las vigas solo están sometidas a su peso propio.

En la Gráfica 23 se puede observar la reducción de volumen de concreto total de la estructura aporticada con respecto a la dosificación de AET.



Gráfica 23. Dosificación vs Volumen de concreto

Este análisis solo incluye la cantidad de volumen que se puede reducir debido a la disminución de los esfuerzos en los elementos, pero se debe decir que al reducir las secciones y teniendo en cuenta los estudios realizados de pushover, deriva y de las deflexiones de los elementos, que la reducción de la sección implicaría efectos negativos en la estructura aporticada.

### 7.3.5 Cortante Basal.

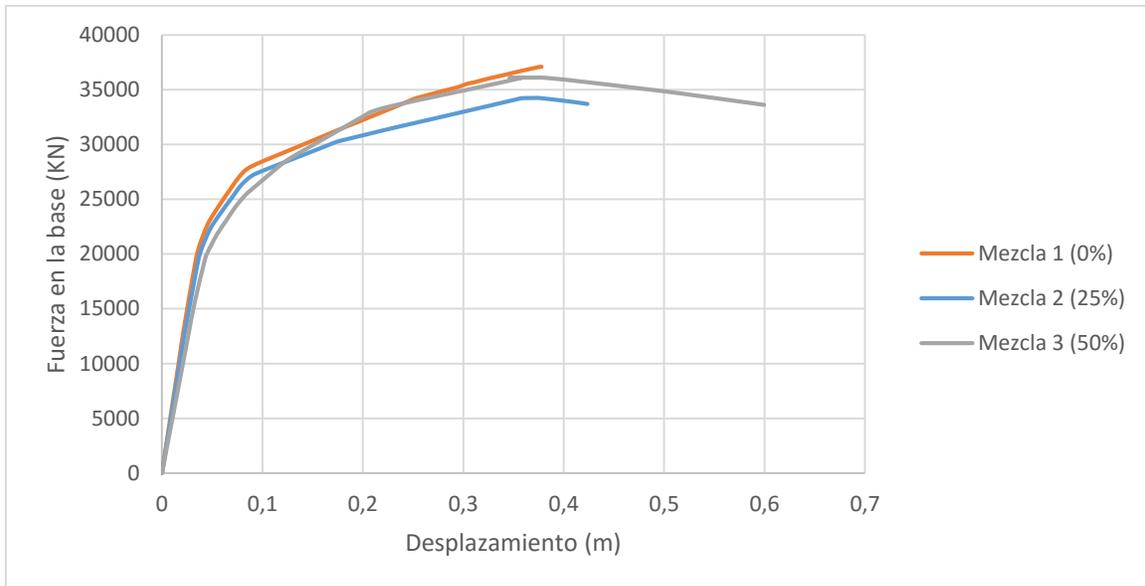
Tabla 32. Cortante Basal para los diferentes modelos

	Piso/Dosificación	0%	25%	50%	0%-25%	25%-50%	0%-50%
Cortante Basal (KN)	1	2340.2848	2225.85468	2148.47709	114.430116	77.3775868	191.807703
	2	5311.77053	5036.29662	4850.01661	275.473914	186.280011	461.753925
	3	8149.88397	7727.22255	7441.41193	422.661413	285.810629	708.472042
	4	11042.2652	10469.6019	10082.3575	572.663297	387.24438	959.907676
	Cubierta	12800.3331	12174.4505	11751.229	625.882629	423.221519	1049.10415

A medida que el peso de cada piso se reduce, debido a que la densidad del concreto ligero es menor a la del concreto convencional, y gran parte del peso de una estructura aporricada en concreto son las losas, así mismo se puede observar en la Tabla 32 que las fuerzas provocadas como reacción del espectro de diseño para un edificio ubicado en la ciudad de Bogotá también se reducen

Entre el modelo del 0% de AET y el del 25% de AET la fuerza se reduce hasta en un 5% en los pisos más pesados. Entre el modelo del 0% de AET y el del 50% de AET la fuerza se reduce hasta en un 9% en los pisos más pesados. Entre el modelo del 25% de AET y el del 50% de AET la reducción no es tan alta como entre el del 0% de AET y el del 25% AET a pesar de que la diferencia entre los porcentaje de dosificación sean los mismos, entre estos modelos se alcanza un 4%.

Esta reducción es muy importante porque estas fuerzas simbolizan la reacción que presenta la estructura, principalmente para fuerzas accidentales como la de un sismo, lo que significa que en una estructura más liviana la fuerza sísmica genera menos afectaciones.



Gráfica 24. Desplazamiento vs Cortante Basal para los diferentes modelos

En la Gráfica 24 se puede observar que los puntos de fluencia, es decir el punto de deformación a partir el cual el acero empieza a deformarse de forma permanente, de los tres modelos son bastante similares, pero se observa que el del modelo del 0% de AET y del modelo del 25% de AET el punto de fluencia se genera con una fuerza mayor para el mismo desplazamiento. El modelo del 25% de AET, resiste menos cortante basal en comparación al modelo del 0% de AET y el del 50% de AET y el que más resiste es del modelo del 0% de AET, seguido del modelo del 50% de AET. Finalmente, se puede observar que la fuerza máxima que resisten los tres modelos se da para el mismo desplazamiento.

### 7.3.6 Beneficios del uso de concretos ligeros estructurales en una estructura aposticada.

Basados en los anteriores análisis y resultados obtenidos mediante la modelación lineal de la misma estructura, variando los tres concretos seleccionados y obtenidos en laboratorio, se llegó a la identificación de los siguientes beneficios de estos concretos en la estructura:

- Efectivamente el peso muerto de la estructura, es el primer aspecto que se ve beneficiado por la implementación de concretos ligeros, esta reducción es de aproximadamente un 30% con respecto al peso muerto de un edificio modelado con concretos de peso normal.
- Debido a la importante reducción del módulo de elasticidad en los concretos ligeros, las derivas de las estructuras no son un criterio que aporte un buen criterio a los beneficios del uso de dichos materiales. Este fenómeno se da gracias a que la reducción del módulo de elasticidad es mayor que el beneficio que ofrece una menor masa del edificio para la misma fuerza sísmica.
- Para el caso del análisis pushover, los concretos ligeros representan beneficios claros en cuanto a la cantidad de elementos estructurales afectados tras una eventualidad sísmica.
- En el caso de la identificación de fuerzas generadas en los elementos estructurales, tales como vigas y columnas, existen beneficios en los momentos, cortantes y cargas axiales generadas. A pesar de esto la disminución de dichas fuerzas no es representativa en el diseño de dichos elementos. En cuanto a deflexiones y flechas se refiere, el concreto ligero no representa un beneficio para la estructura debido a su bajo módulo de elasticidad.
- Los beneficios que ofrecen los concretos ligeros en el cortante basal, no resultan del todo concluyentes ya que se calcularon por métodos distintos y cada uno arroja resultados opuestos, a pesar de esto el método más acertado es el de la modelación en SAP2000, el cual no tiene como único parámetro el peso muerto de la estructura,

también tiene en cuenta características tales como el módulo de elasticidad, y un cálculo más aproximado de la carga que actúa sobre el edificio.

#### 7.4 Análisis costo beneficio.

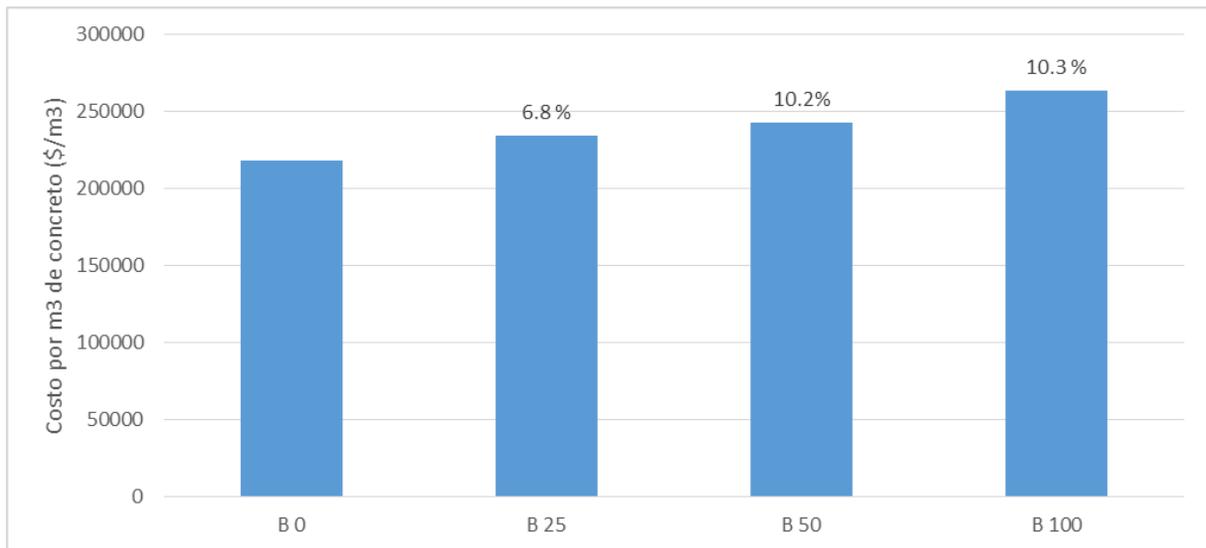
##### 7.4.1 Costo del concreto.

En cuanto al costo del concreto y basados en los diseños de mezcla se obtuvieron los siguientes resultados.

*Tabla 33. Costo por m<sup>3</sup> de concreto para cada dosificación de AET*

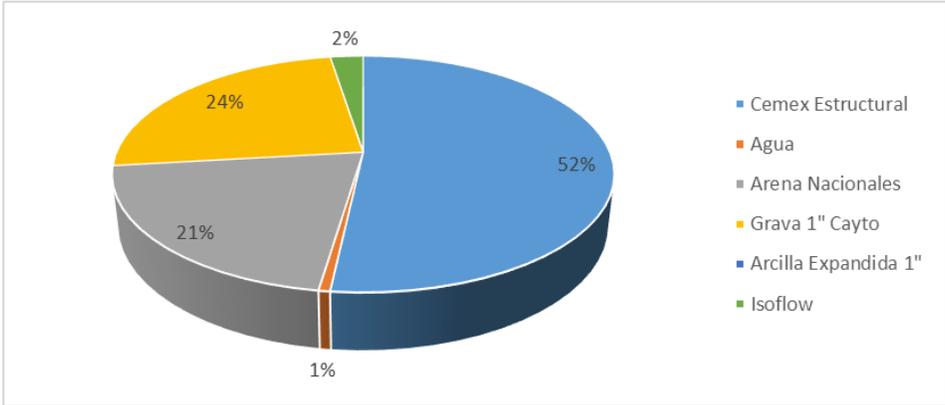
Diseños de mezcla				
Dosificación (%)	0%	25%	50%	100%
Costo por M <sup>3</sup>	\$ 217,893	\$ 233,941	\$ 242,634	\$ 263,640

Observando que la relación que existe entre la dosificación de AET y el costo del concreto por m<sup>3</sup> es directamente proporcional, encareciendo así a los concretos con mayor porcentaje de agregados ligeros.

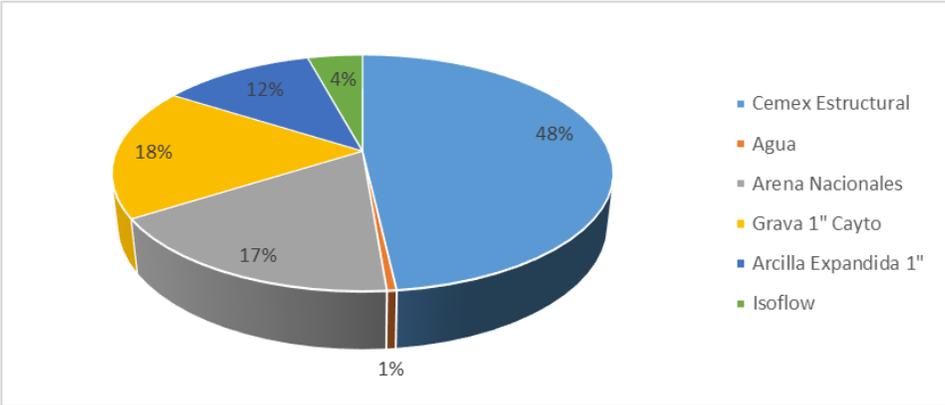


*Gráfica 25. Costo por m<sup>3</sup> de concreto para cada dosificación de AET*

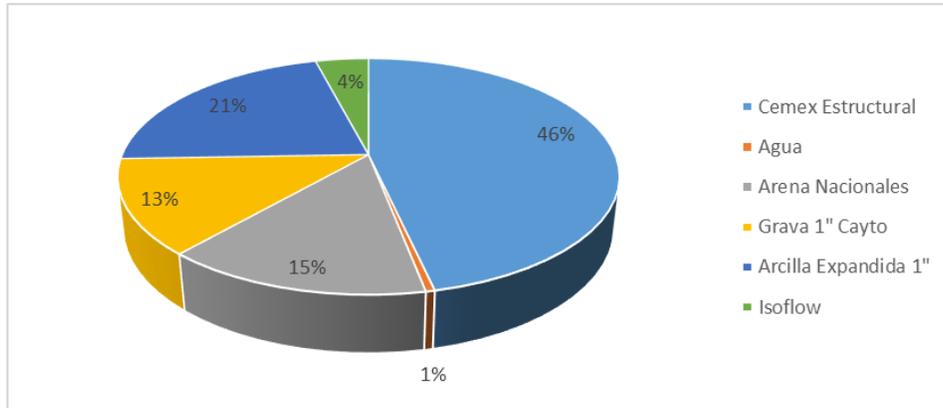
Adicionalmente es posible observar que a medida que la dosificación de AET aumenta, este no es el único rubro en la elaboración del concreto que cobra importancia como se muestra en las siguientes gráficas.



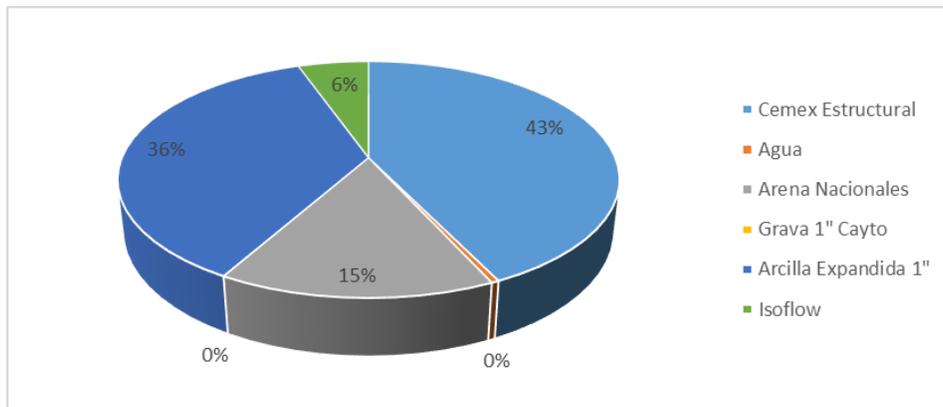
Gráfica 26. Rubro del concreto hecho con 0% de dosificación de AET



Gráfica 27. Rubro del concreto hecho con 25% de dosificación de AET



Gráfica 28. Rubro del concreto hecho con 50% de dosificación de AET



Gráfica 29. Rubro del concreto hecho con 100% de dosificación de AET

De las anteriores graficas es posible determinar que a pesar que las AET cobran importancia en el costo del concreto a medida que se aumenta su dosificación y su costo es demasiado elevado frente al de un agregado convencional, este nunca alcanza a superar el costo del cemento.

También es posible observar que a medida que se incrementa el porcentaje de dosificación de AET la cantidad de súper plastificante “ISOFLOW” aumenta y por ende su repercusión en el costo total de los concretos.

#### 7.4.2 Costos en la estructura en concreto.

Para el análisis de resultados de esta sección se expondrán los resultados de cada una de las estructuras mencionadas en el capítulo 6.2, presentado primero el peso muerto de cada una de las estructuras y luego el costo estimado en concreto de cada una de ellas.

*Tabla 34. Peso muerto por modelo*

ESTRUCTURA	CARGA MUERTA (KN)	REDUCCIÓN (%)
ED0-0	43101.05	0.0%
ED0-25	42459.88	1.5%
ED0-50	42024.64	2.5%
ED0-100	41230.84	4.3%

Los valores expuestos en la tabla anterior fueron calculados mediante el programa de métodos numéricos SAP2000, donde las vigas y columnas fueron modeladas con un concreto convencional y el material del entrepiso se varió entre los 4 concretos expuestos en el presente documento.

Posteriormente y para un cálculo del costo del concreto de cada una de las estructuras se presentan los resultados obtenidos en la siguiente tabla.

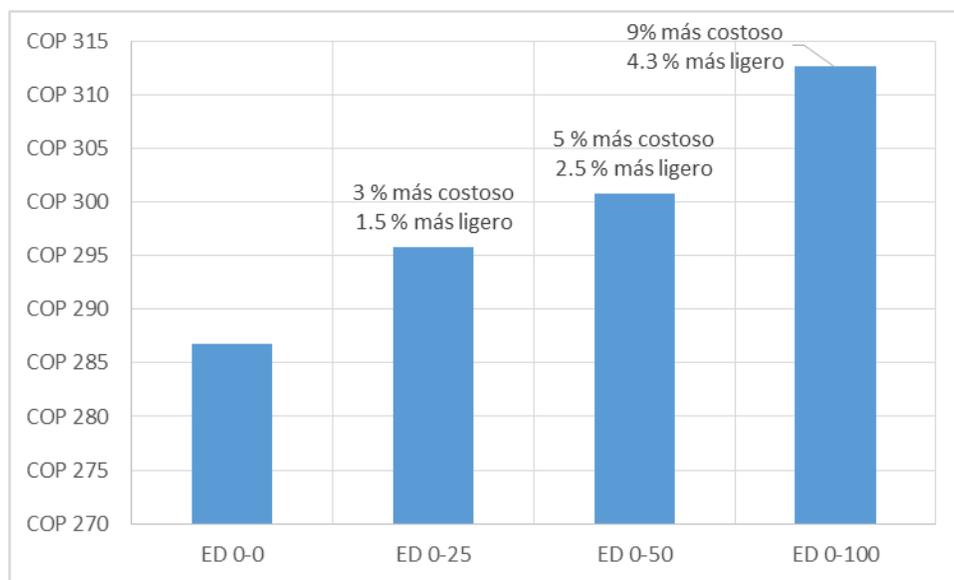
*Tabla 35. Costos en millones de pesos por modelo*

ESTRUCTURA	COSTO CONCRETO (COP)	AUMENTO (%)
ED0-0	286,719,422	0.0%
ED0-25	295,818,626	3.2%
ED0-50	300,747,894	4.9%
ED0-100	312,658,025	9.0%

El costo de cada una de las estructuras se basó en los resultados obtenidos en el subcapítulo inmediatamente anterior y en las combinaciones de concreto propuestas para las estructuras,

obteniendo como resultado estructuras cada vez más costosas a medida que se busca reducir la carga muerta de estas.

En resumen efectivamente se logra reducir la carga muerta de las estructuras a medida que se incrementa la dosificación de AET, pero como se observará en la siguiente grafica el aumento de este material en el concreto representa un aumento directo en el costo de los materiales.



Gráfica 30. Costo total de cada modelo

Los resultados expuestos en la Tabla 35 presenta los costos en millones de pesos, adicionalmente es posible observar que tanto el aumento en el costo como la disminución en la carga muerta se comportan de manera casi lineal.

Adicional al comportamiento lineal del costo y la carga muerta, es posible observar que entre ellos también existe una relación directa que implica que si quiero reducir un 1% la carga muerta de la estructura el edificio será un 2% más costoso.

## 8. CONCLUSIONES.

Basados en los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, se divide este capítulo en tres secciones:

### 8.1 Propiedades físicas analizadas de la Arcilla expandida Térmicamente nacional.

- La granulometría de la AET, no encaja en los límites establecidos por la NTC 4045, por lo tanto no cumple con este requisito.
- La masa unitaria compactada de la AET, encaja entre los límites establecidos por la NTC 4045, en los cuales se establece que un agregado grueso ligero como la AET no debe superar los  $880 \text{ kg/m}^3$ , a pesar de esto es posible encontrar agregados más ligeros.

### 8.2 Concreto ligero estructural.

- El concreto con más del 50% de reemplazo de AET se puede clasificar como concreto ligero. Las normativas nos indican que para que un concreto sea ligero su masa unitaria debe ser menor a  $1950 \text{ kg/m}^3$ .
- Concretos menos resistentes. Se puede concluir que el efecto del uso de AET en concretos ligeros muestra una disminución significativa de la resistencia de estos.
- Respecto al módulo de elasticidad se encontró que los concretos ligeros presentan valores menores de módulo de elasticidad, con disminución entre el 20% y el 40% para dosificaciones respectivamente del 50% y del 100% con respecto a la mezcla testigo (0% de AET).
- Con respecto a la permeabilidad los concretos ligeros hechos con AET mostraron tener muy altas permeabilidades. Al contrario de lo que se pensaba, la pasta de

cemento no ayuda a impermeabilizar estos concretos. Estas altas permeabilidades implican baja durabilidad ante agentes químicos y naturales que puedan atacar las estructuras.

### 8.3 Identificación de los beneficios del uso de concretos ligeros en una estructura aporticada.

- En cuanto al peso muerto, se concluye que existe una disminución entre 5% y el 10% del peso total de la estructura, lo cual se podría reflejar en una disminución de las dimensiones de la cimentación.
- Se puede concluir que la deriva se ve afectada negativamente por el uso de estos concretos ligeros debido al bajo módulo de elasticidad que los caracteriza.
- Es posible determinar que no es pertinente el uso de estos concretos ligeros para elementos estructurales, tales como vigas y columnas, ya que a pesar de la influencia positiva su bajo peso, es mayor la influencia negativa del menor módulo de elasticidad en dichos elementos.
- En cuanto al análisis dinámico (pushover) de las estructuras, se puede concluir que a pesar de que las estructuras en concreto ligero presentan menor número de elementos estructurales afectados (rotulas plásticas), estas llegan primero al colapso que las estructuras diseñadas con concretos convencionales.
- Se concluye que el uso de estos concretos no representa cambios significativos en los esfuerzos generados en los elementos estructurales tales como vigas y columnas.
- Debido a su bajo módulo de elasticidad las deflexiones en elementos estructurales aumentan, con respecto a los elementos estructurales hechos en concreto convencional.

- En cuanto al cálculo del cortante basal, sugerido por la NSR-10, se concluye que la fuerza sísmica que actúa sobre la estructura es proporcional a la disminución del peso muerto.

## 9. RECOMENDACIONES

La presente investigación arrojó algunas inquietudes que no fueron resueltas en este trabajo, debido a que no eran objeto del mismo. Las cuales se presentan a continuación discriminándolas por su alcance.

### 9.1 En cuanto a la AET

- Se recomienda estudiar procesos de producción alternos, que generen menor cantidad de arenas y finos, para que este producto cumpla con el requisito de la NTC 4045.
- De igual forma se recomienda profundizar acerca de métodos que reduzcan la absorción de dichos agregados, para así reducir las incertidumbres acerca de las relaciones A/C.

### 9.2 En cuanto a concretos ligeros hechos con AET

- Se recomienda estudiar la compatibilidad de deformación entre el concreto ligero y el acero estructural, con el fin de proponer concretos ligeros estructurales reales.
- Se recomienda investigar a profundidad estrategias que aumenten el módulo de elasticidad de los concretos ligeros, con el fin de mejorar las características mecánicas de estos concretos.
- Se recomienda estudiar concretos de alta resistencia hechos 100% con AET, para determinar con mayor precisión sus características mecánicas y proponer materiales competentes frente las necesidades actuales.
- Estudiar a profundidad el efecto de la interfaz entre la pasta de cemento y las AET, en la permeabilidad de los concretos ligeros, con el fin de proponer alternativas que brinden concretos más durables.

- Estudiar el efecto de segregación de los agregados ligeros en el concreto, para diferentes manejabilidades.

### 9.3 En cuanto la modelación estructural con concreto ligeros:

- Se recomienda hacer estudios más profundos acerca del comportamiento dinámico de estructuras hechas con concreto ligero, con el fin de determinar correlaciones entre masa, módulo de elasticidad, deriva y cortante basal.
- Un análisis más detallado del efecto que tiene el módulo de elasticidad y la baja densidad sobre los elementos estructurales de un edificio.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Hou, Caicedo y Falconi (2015). Hormigones Livianos de Alto desempeño. Revista Tecnológica ESPOL.

Kumar, P. y J.M.Monteiro, Paulo (2014). “Special Types of concrete”. *Concrete: Microstructure, properties and materials*. New York: McGraw-Hill Education.

Asocreto (2010). Tecnología del concreto: materiales, propiedad y diseño de mezcla. Colombia: Nomos impresores.

Moravia, Gumieri, Vasconcelos (2010). Efficiency factor and modulus of elasticity of lightweight concrete with expanded clay aggregate. *IBRACON Struct Mater*. 3 2

Martinez Diego , (2010). Concreto liviano estructural con arcilla expandida termicamente extraída de canteras localizadas en el sur de la sabana de Bogotá: Etapa experimental. 1. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.

Angelin, Cechhe, Mouta, Gachet (2010). Study of density and Modulus of Elasticity of lightweight Concrete with Brazilian aggregate. *Researchgate*.

Norma Sismo Resistente colombiana (2010).

Cruz, Buncuga, Cahuape, Forgione y Navarrete (2003). Hormigones con agregados livianos. Facultad de ciencias exactas y agrimensura, Universidad del Rosario. Buenos Aires.

Chandra, Satish y Berntsson, Leif (2002). *Lightweight aggregate concrete: science, technology and applications*. New York: Notes Publications.

Sánchez de Guzmán, Diego (2001). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores.

Economic Design and Construction with LightWeight Aggregate Concrete (1998). *LWAC material properties*

Neville, A.M (1988). Tecnología del concreto. México: Noriega Editores.

Neville, A.M y Brooks, J.J (1998). Tecnología del concreto. México: Editorial Trillas.

Punkki, J., Gjörv, O.E. (1995). Effect of water absorption by aggregate on properties of highstrength lightweight concrete. CEB/FIP International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway, pp 604-616. Editors: I. Holand et al.

Maage, M., Helland, S., Carlsen, J.A. (1995). Service life prediction of LWA concrete in chloride environment. CEB/FIP International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway, pp 563-573, Editors: Holand, I., et al

Smepllass S. (1992). Materialutvikling Høyfast Betong, Report 5.6 Effect of the Aggregate Type on the Compressive Strength and E-modulus of the Aggregate, SINTEF-report STF70 A92051 Trondheim, Norway

COMMITTEE ACI 201.2 (1991)

Centro de investigaciones avanzadas en Tecnología del Hormigón. Composición del  
Hormigón Liviano Estructural. Córdoba, Argentina. Web

Khokhrin, N.K. (1973). The durability of lightweight concrete structural members.

Kuibyshev, USSR

## ANEXOS

Tabla 36. Datos del ensayo de resistencia a compresión para las diferentes mezclas con relación A/C de 0.74

Edad de ensayo (días)	Tipo de mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)			
5	0% AET	19.3	18.2	18.5	18.7
	25% AET	16.1	16.9	16.5	16.5
	50% AET	14.3	14.1	14.5	14.3
	100% AET	13.7	14.1	9.4	13.9
7	0% AET	20.2	20.3	20.7	20.4
	25% AET	17.8	17.6	18.1	17.8
	50% AET	14.4	16.4	15.1	15.3
	100% AET	13.7	13.9	14.2	13.9
28	0% AET	29.37	24.7	26.5	25.6
	25% AET	20.35	21.5	20.3	20.7
	50% AET	17.6	19.9	19.1	18.9
	100% AET	16.02	16.1	17.8	16.6

Tabla 37. Datos del ensayo de resistencia a compresión para las diferentes mezclas con resistencia constante

Edad de ensayo (días)	Tipo de mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)			
7	0% AET	19.6	23.9	25.3	24.6
	25% AET	24.1	24.2	24.9	24.4
	50% AET	24.6	24.0	24.7	24.4
	100% AET	16.4	15.9	16.7	16.3
28	0% AET	30.1	29.7	28.8	29.5
	25% AET	28.82	28.73	29.9	29.2
	50% AET	28.1	29.2	28.7	28.7
	100% AET	20.5	19.5	19.3	19.8

Los datos en rojo son los atípicos.