

## **CAPÍTULO 1.- ANTECEDENTES.**

### **1.1.- PROBLEMA.**

El elevado peso propio, que limita la posibilidad de abarcar tramos más largos entre columnas y fabricación de elementos más esbeltos. Motivo por el cual el punto de vista de mayor desarrollo para el hormigón armado se ha enfocado en optimizar su aplicación, ya sea reduciendo el peso o superando la debilidad natural del hormigón a esfuerzos de tensión.

#### **1.1.1.- Planteamiento.**

El hormigón es en la actualidad el material más usado en la industria de la construcción; sin embargo, la alta densidad o peso volumétrico de los hormigones convencionales (igual o mayor a  $2400 \text{ kg/m}^3$ ), ha sido un inconveniente donde la carga muerta es un factor importante, generado principalmente por el tipo de agregado que se utiliza para su elaboración.

Es muy pesado para ser práctico, sobre todo en la construcción de losas de entrepiso y azoteas, ya que éstas están diseñadas para soportar las cargas vivas (personas y mobiliario), dichas cargas se transmiten a las trabes, éstas a las columnas y finalmente a la cimentación y al terreno; los efectos son construcciones pesadas, vigas de gran peralte, columnas robustas y cimentaciones amplias o complejas, esto debido al excesivo peso muerto de las losas de hormigón convencional, lo cual se traduce en un elevado costo de la obra.

Con el fin corregir algunas insuficientes cualidades del hormigón y dificultades que se tiene en el ámbito de la construcción, es que se ve necesario estudiar la manera de aligerar el peso de los elementos.

Las alternativas que se pueden plantear son las siguientes:

- Hormigón estructural liviano usando poliestireno expandido como agregado.
- Hormigón estructural liviano usando poliestireno expandido modificado como agregado.
- Hormigón estructural liviano usando cáscara de palma como agregado.
- Hormigón estructural liviano usando piedra pómez.

### **1.1.2.- Formulación.**

El escombros virgen de poliestireno expandido (EPS) puede ser usado como un agregado ultraligero para la elaboración de hormigones, sin embargo la baja densidad y casi nula resistencia que posee el EPS influye directamente en la poca adherencia que muestra por lo que no tiene popularidad como agregado liviano.

La cáscara de palma se constituye como una de las alternativas más prometedoras. Por otra parte, la industria del aceite de palma, es importante en muchos países como Malasia, Indonesia y Nigeria, produciendo grandes cantidades de residuos que pueden ser utilizados en la producción de componentes de edificaciones, pero su viabilidad en la región es nula debido a la inexistencia de esta planta en el sur de América.

La piedra pómez, al ser un material poroso y de bajo peso específico que de igual manera es una buena alternativa para la elaboración de hormigones livianos estructurales, pero el acceso al mismo significa un costo que no justificaría su utilización.

Por otro lado el poliestireno expandido modificado (MEPS) puede ser empleado para la elaboración tanto de hormigones estructurales como no estructurales, debido a la mejora de las propiedades físico-mecánicas que adquiere éste después del tratamiento, mejorando la adherencia del mismo con la pasta, logrando una mejor compatibilidad de los materiales con el MEPS.

Es de esta manera la mejor alternativa para solucionar al elevado peso propio de los elementos para obtener un hormigón estructural, usando MEPS como reemplazo al agregado natural en porcentajes controlados.

### **1.1.3.- Sistematización.**

Con el reemplazo del agregado con poliestireno expandido modificado (MEPS) en diferentes porcentajes controlados, es como se tratara de garantizar la obtención y elaboración de un hormigón estructural liviano.

En el caso de que se obtengan hormigones no estructurales ver el campo de aplicación más óptimo en el cual se le puede dar el mejor uso a este hormigón liviano.

Las series y porcentajes de reemplazo realizadas en el presente trabajo son:

Serie H°40.- El cual posee un reemplazo del 40% en el volumen de grava natural y un 5% en el volumen de agregado fino natural.

Serie H°60.- El cual posee un reemplazo del 60% en el volumen de grava natural y un 5% en el volumen de agregado fino natural.

Serie H°80.- El cual posee un reemplazo del 80% en el volumen de grava natural y un 5% en el volumen de agregado fino natural.

Serie H°100.- El cual posee un reemplazo del 100% en el volumen de grava natural y un 0% en el volumen de agregado fino natural.

## **1.2.- OBJETIVOS.**

El estudio plantea como objetivo general y específicos los siguientes:

### **1.2.1.- Objetivo General.**

Evaluar la resistencia característica a compresión y la disminución del peso específico de hormigones livianos estructurales, usando como agregado poliestireno expandido modificado mediante tratamiento térmico.

### **1.2.2.- Objetivos Específicos.**

- Realizar el acopio y reciclado del EPS y su posterior fabricación del agregado (MEPS).
- Realizar la caracterización del MEPS.
- Evaluar a resistencia característica del hormigón a los 7, 14 y 28 días, reemplazando el agregado grueso en un 40%, 60%, 80% y 100% con MEPS; y el agregado fino en un 5% respectivamente con MEPS, excepto el caso donde se reemplaza el 100% de agregado grueso.
- Evaluar la disminución de la masa específica del hormigón confeccionado con MEPS para su posterior clasificación.
- Realizar una evaluación de precios unitarios de la mejor alternativa, para ver la viabilidad de mercado de la misma.

### **1.3.- JUSTIFICACIÓN.**

Las razones de la realización del estudio son:

#### **1.3.1.- Teórica.**

La presente investigación pretende, comprobar y verificar la validez de modelos teóricos, además de la introducción de conceptos conocidos pero aplicados en la construcción de elementos estructurales, buscar respuestas respecto a la aplicación de nuevas alternativas en construcción, para disminuir el peso propio del hormigón y las potenciales bondades que puede brindar.

#### **1.3.2.- Metodológica.**

Para cumplir los objetivos, se considera necesario realizar un análisis comparativo en base la información recopilada, de manera que sea posible determinar la hipótesis de estudio, para luego contrastar en el desarrollo de la investigación, las propiedades físico – mecánicas de hormigones livianos, analizando por medio de testigos físicos; y poder determinar similitudes, diferencias, ventajas y desventajas de la alternativa en

comparación al hormigón convencional y la posibilidad de implementación en el medio local.

### **1.3.3.- Práctica.**

La investigación propuesta permitirá en primera instancia definir una alternativa viable al problema, que cumpla con los objetivos; y posteriormente la comprobación de la alternativa elegida en la solución de la problemática de hormigones convencionales pesadas, en lo que se refiere a la posibilidad de obtención, aplicación e introducción de nuevas tecnologías en la construcción local, aplicación de los métodos elegidos, a fin de comparar técnicas actuales con otras diferentes que cumplan con los requerimientos mínimos de calidad, resistencia y seguridad, permitiendo la explicación y validación de conocimientos teóricos.

### **1.4.- ALCANCE DEL ESTUDIO.**

En la propuesta se ha definido el tipo de investigación como la siguiente:

#### **1.4.1.- Tipo de Estudio.**

La investigación es necesaria realizarla para recaudar información primaria y así cumplir con los objetivos propuestos y verificación de hipótesis. De esta manera se realizara un estudio del tipo experimental.

Debido a que el investigador determino la participación de las variables para obtener de esta forma una relación causa y efecto, por medio de ensayos en el laboratorio de suelos y hormigones de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la U.A.J.M.S.

#### **1.4.2.- Hipótesis.**

Como hipótesis del estudio se planteó:

“Con la inclusión de poliestireno expandido modificado (MEPS) se logra obtener hormigones estructurales livianos, de peso específico menor a los 2000 kg/m<sup>3</sup> y con una resistencia característica a compresión que supera los 17MPa (Código ACI 318-05), con la sustitución del agregado grueso en un 60% y el agregado fino en un 5%.”

Pudiendo observar las siguientes variables que intervienen en la investigación:

**Variables independientes son:**

- Agregado grueso natural.
- Agregado fino natural.
- Cemento.
- Agua.
- Poliestireno expandido modificado.

**Variable dependiente son:**

- Disminución del peso específico.
- Resistencia característica a compresión.

**1.4.3.- Restricciones.**

La presente investigación se limitara a evaluar únicamente la resistencia característica del hormigón a compresión.

La caracterización del MEPS se limitara solo a granulometría, pesos específico y peso unitario.

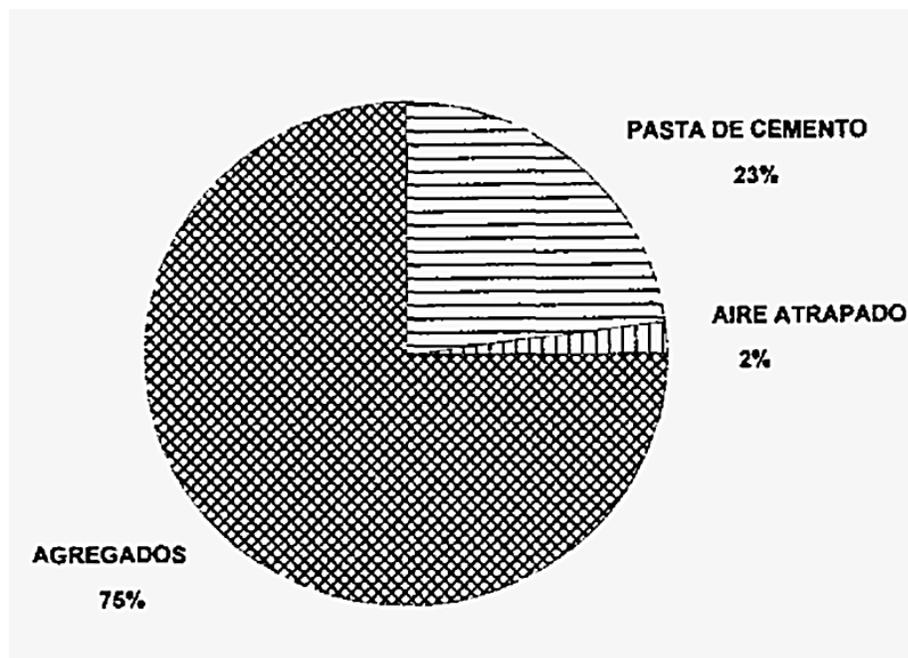
## CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO.

### 2.1.- INTRODUCCIÓN.

El concreto cuyas características de resistencia, versatilidad, durabilidad y economía, lo han convertido en el material de construcción más utilizado en el mundo, se puede definir como una piedra artificial formada por cemento portland, agregados, agua y aire, material de naturaleza simple, pero con una compleja naturaleza interna.

De sus componentes, se tenía la hipótesis de que el cemento era la parte activa que reacciona con el agua, utilizando a los agregados como material de relleno, pero se ha puesto en evidencia que los agregados participan activamente en la vida del concreto. Con una idea muy general se puede hablar de que los integrantes del concreto se encuentran distribuidos, tomando como base su peso en los porcentajes siguientes:

Pasta (Cemento + Agua) de un 23% a un 25 %, Agregados (Grava y Arena) de 73S a 75 % y aire atrapado 2 % y una masa específica media de  $2400 \text{ kg/m}^3$ .



*Figura 1) 2.1: Porcentajes de los componentes del hormigón.*

(Fuente: Libro de Construcciones 2)

El hormigón es un material semejante a la piedra que se obtiene mediante una mezcla cuidadosamente proporcionada de cemento, arena, grava u otro agregado, y agua;

después, esta mezcla se endurece en formaletas con la forma y dimensiones deseadas. El cuerpo del material consiste en agregado fino y grueso. El cemento y el agua interactúan químicamente para unir las partículas de agregado y conforman una masa sólida. Es necesario agregar agua; además de aquella que se requiere para la reacción química, con el fin de darle a la mezcla la trabajabilidad adecuada que permita llenar las formaletas y rodear el acero de refuerzo embebido, antes que inicie el endurecimiento.

## **2.2.- HORMIGÓN LIVIANO.**

Se puede deducir de su nombre que el hormigón liviano, es un tipo de hormigón con características propias, que por algún medio u otro se ha hecho más ligero que el hormigón convencional (cemento, grava, arena, agua), que por tanto tiempo ha sido el principal material empleado en la construcción.

Aunque el hormigón liviano se ha hecho muy conocido en los últimos años, no representa en ningún caso una nueva clase de material para la construcción, considerando además que tiene una gran adaptación mundial por las ventajas que brinda tanto en el diseño al disminuir cargas muertas, como en la ejecución al poseer menores costos de transporte y mayor rapidez de construcción, llegando incluso a mejorar la confortabilidad habitacional por otorgar cualidades de aislación acústica y térmica, punto importantísimo hoy en día por la crisis energética mundial.

### **2.2.1.- Antecedentes Históricos.**

<sup>1</sup>Los primeros hormigones livianos utilizados para construir edificaciones surgieron en el imperio Romano en los años 20 a.C. <sup>2</sup>Estos eran resultado de la mezcla de materiales cementantes formados a partir de limos quemados con materiales de baja densidad como lo es la piedra pómez. Entre las obras realizadas con este tipo de hormigón

---

<sup>1</sup> HERNANDEZ A. Comportamiento Estructural de Elementos Flexurales de Hormigón Liviano, Tesis. Chile: Universidad Pontificia Católica de Chile, 2011, p. 2.

<sup>2</sup> Galli A. Las inmigraciones Italianas y Su aporte Técnico Ornamental a la Arquitectura y Urbanismo, Tesis. Argentina: Universidad de Belgrano, 2011, p. 22.

destacan: la cúpula del Panteón de Agripa (25 a.C.) y los arcos del Coliseo Romano (70d.C.), este último con luces mayores a 25 metros.

<sup>3</sup>Los avances tecnológicos han permitido la experimentación con agregados ricos en sílice como la cascarilla de arroz, agregados artificiales plásticos (poliestireno) y agregados livianos (arcillas, pizarras y escorias expandidas). Los primeros edificios construidos con hormigos estructurales livianos aparecieron luego de la primera Guerra Mundial. En el año 1922 se construyó la ampliación del Gimnasio de la Escuela de Deportes Acuáticos de la ciudad de Kansas, naciendo así la primera obra de hormigón liviano estructural de la historia. El suelo donde se cimento dicho edificio tenía una capacidad de soporte muy baja, por esta razón se utilizó un hormigón liviano, aligerando la carga generada por el peso propio. Durante el año 1928 se realizó un estudio de estructuración con el fin de incrementar el número de plantas del edificio de oficinas de la compañía de teléfono Southwestern Bell de la ciudad de Kansas, el cual contaba con 14 pisos. Así, se investigó sobre la cimentación y se determinó que a dicha estructura se le podían adicionar 8 pisos más utilizando hormigón convencional, no obstante al utilizar hormigón liviano en base a arcillas expandidas, dicha construcción se incrementó a 14 plantas.

### **2.2.2.- Concepto.**

La definición de hormigón liviano ha tomado forma en las últimas décadas, en la actualidad se le puede definir por medio de características físicas que le dan el nombre. Una de estas características es la densidad o peso específico, cuyos valores fluctúan entre los 300 kg/m<sup>3</sup> y los 1840 kg/m<sup>3</sup>, a diferencia del hormigón convencional que posee una densidad promedio que rodea los 2400 kg/m<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> HERNANDEZ A. Comportamiento Estructural de Elementos Flexurales de Hormigón Liviano, Tesis. Chile: Universidad Pontificia Católica de Chile, 2011, p. 7.

### 2.2.3.- Tipos de Hormigones Livianos.

<sup>4</sup>La construcción de hormigones livianos requiere de la inclusión de aire en su estructura. Sin embargo, este tipo de material se tipifica de tres maneras, acorde a su tipo de producción:

#### a.- Hormigón sin finos.

Es aquel que se excluyen los finos en la mezcla, quedando una gran cantidad de espacios vacíos entre el agregado grueso.

#### b.- Hormigón de agregados livianos.

Son aquellos en que se sustituyen los agregados naturales cuya densidad promedio de  $2600 \text{ kg/m}^3$ , por agregados de baja densidad aparente, con extremos que van desde  $10 \text{ kg/m}^3$  en el poliestireno expandido hasta los  $1250 \text{ kg/m}^3$  en la escoria de alto horno.

#### c.- Hormigón gaseoso.

Esta variedad se logra produciendo burbujas de aire en gran cantidad dentro de un mortero de hormigón, de manera que al fraguar quede con una estructura celular esponjosa. Se tiene que considerar la diferencia de estas grandes burbujas de aire con el aire de la mezcla (micro burbujas).

#### d.- Hormigón estructural.

Este tipo de hormigón es definido por la norma ASTM C330-03 (2005) de las siguientes formas:

Aquel realizado utilizando sólo agregados livianos y cuyo peso unitario seco está entre  $1760$  y  $1600 \text{ kg/m}^3$  con un esfuerzo mínimo a compresión a los 28 días de  $17 \text{ MPa}$ .

---

<sup>4</sup> SHORT K. Hormigón Liger. Mexico, 1980, p. 17,18

Aquel confeccionado con arena natural y agregado grueso liviano, cuyo peso unitario seco está entre 1840 y 2000 kg/m<sup>3</sup> con esfuerzo mínimo a compresión a los 28 días de 17 MPa.

### **2.3.- AGREGADOS LIVIANOS.**

<sup>5</sup>Los agregados cumplen un papel de gran importancia en el hormigón, más aun en los de tipo liviano debido a su baja densidad. Este tipo de agregados puede obtenerse de la naturaleza o ser fabricado por el hombre. El recurso natural más utilizado es el material volcánico. Por su parte los agregados livianos sintéticos son producidos generalmente por procesos térmicos en fábricas.

#### **2.3.1.- Antecedentes Históricos.**

<sup>6</sup>Inicialmente, los agregados livianos (LWAs) fueron de origen natural, en su mayoría volcánicos: piedra pómez, escoria, toba, etc. Éstos se han utilizado como agregados finos y gruesos.

En su utilización como agregado fino cumple la función de material puzolánico activo. Éstos interactúan con el hidróxido de calcio, generado en la mezcla durante la hidratación, produciendo hidrato de silicato de calcio, el cual fortalece la estructura y modifica la morfología del poro, mejorando las propiedades de durabilidad.

La creciente demanda y la escasa oferta de LWAs naturales en todo el mundo, ha tenido como consecuencia el desarrollo de técnicas para su producción en fábricas. Éstos son producidos a partir de materias primas naturales como la arcilla expandida, esquisto, pizarra, etc. A su vez de subproductos industriales, tales como cenizas volantes, cama de cenizas, escoria de alto horno, etc. Las propiedades de los agregados dependen de las materias primas y el proceso utilizado para su producción.

---

<sup>5</sup> HOU D., CAICEDO J., FALCONI A. Hormigones Livianos de Alto Desempeño. Tesis. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2009, p.9.

<sup>6</sup> VARELA N. Hormigones Livianos. Monografía. Ecuador: Universidad Católica de Guayaquil, 1995, p. 27

Hasta la década del cincuenta no hubo una ejecución técnica en cuanto a la producción de agregado para hormigón. Así, en el año 1950 se desarrolló la industria del hormigón liviano basado en partículas de combustible pulverizado, producto del consumo de estaciones termoeléctricas que utilizaban desechos de combustión de elementos bituminosos. Posteriormente, entre 1950 y 1960, comenzaba la instalación mundial de plantas de agregados livianos. En Latinoamérica, Charallave Venezuela di el primer paso durante el año de 1969, instalando una planta sobre un yacimiento de 50 has. de arcilla, la que aun entrega su materia prima.

<sup>7</sup>Actualmente los agregados livianos se producen en una amplia gama de densidades, las que varía de  $50 \text{ kg/m}^3$  como la perlita expandida, a  $1000 \text{ kg/m}^3$  para el Clinker. Con estos agregados y reductores de agua de alto rango, ha sido posible confeccionar cubos de hormigones livianos de 15 cm de arista capaces de soportar fuerzas de compresión de 80 MPa.

### **2.3.2.- Agregados Naturales.**

#### **2.3.2.1.- Origen volcánico.**

<sup>8</sup>El magma volcánico se encuentra en un punto de ebullición que puede contener aire y gas. Ésta, al enfriarse forma una masa porosa y esponjosa producto de los espacios que ocupan estos gases dentro de ella. Puesto que hay un enfriamiento brusco de la masa fundida de magma, el material se endurece adquiriendo una estructura vítrea y muy amorfa, un proceso similar a la producción de cristal conocido como obsidiana, ya que en ambos procesos interviene un líquido súper enfriado que no tiene fase cristalina.

En otras palabras, se produce un material ligero y poroso, conocido como agregado volcánico, el que puede ser de piedra pómez o escoria volcánica. Los agregados son

---

<sup>7</sup> CHANDRA S., BERNTSSON L., Lightweight Aggregate Concrete. Suecia: Chalmers University of Technology, 2002, p. 1.

<sup>8</sup> CHANDRA S., BERNTSSON L., Lightweight Aggregate Concrete. Suecia: Chalmers University of Technology, 2002, p. 2.

producidos por la manipulación mecánica de magma enfriada, es decir, el chancado, tamizado y triturado.

La práctica de piedra pómez no es apropiada para hormigones colados in situ debido a su tendencia flotar, conduciendo así la segregación de la mezcla. En su estado natural contiene usualmente impurezas y si se usa con refuerzo, debe lavarse antes de mezclarse.

### **2.3.2.2.- Agregados orgánicos.**

<sup>9</sup>Dentro de esta grama de agregados, la cáscara de palma se constituye como una de las alternativas más prometedoras. Por otra parte, el uso de residuos agrícolas como agregados para la producción de materiales de construcción tiene varias ventajas prácticas y económicas. La industria del aceite de palma, importante en muchos países como Malasia, Indonesia y Nigeria, produce grandes cantidades de residuos que pueden ser utilizados en la producción de componentes de edificación.

Paralelamente, las cáscaras de palma se producen en volúmenes importantes en los molinos de aceite pudiendo utilizarse como agregados en la producción de hormigón ligero.

La cáscara de palma tiene una densidad de  $620 \text{ kg/m}^3$  y una densidad relativa de 1.25, siendo rígida, por tanto posterior a su procesamiento para extraer aceite, se obtiene una pieza aplastada muy resistente. Aunque su uso no alcanza niveles de comercialización, se utiliza de manera local para generar hormigones livianos, teniendo como ventaja su nulo valor comercial y gran disponibilidad, siendo el costo de transporte nominal.

---

<sup>9</sup> CHANDRA S., BERNTSSON L., *Lightweight Aggregate Concrete*. Suecia: Chalmers University of Technology, 2002, p. 11.

### **2.3.3.- Agregados sintéticos.**

<sup>10</sup>Son producidos por medio de tratamiento térmicos de los materiales que tiene propiedades de expansión. Estos materiales se pueden dividir en tres grupos:

- a.- Materiales naturales como perlita, vermiculita, arcilla, pizarra.
- b.- Productos industriales tales como el vidrio.
- c.- Subproductos industriales como cenizas volantes, escorias de alto horno, etc.

Los tipos más comunes de áridos ligeros producidos a partir de arcillas expansivas se conocen como leca y liapor, mientras que los generados a partir de cenizas volantes se denominan lytag. Cabe destacar que la densidad aparente de los agregados varía mucho dependiendo de las materias primas y el proceso utilizado para su fabricación.

## **2.4.- POLIESTIRENO EXPANDIDO.**

El poliestireno expandido o EPS es un material plástico espumado inerte y no degradable. Debido a sus propiedades físicas y características térmicas, el EPS es ampliamente utilizado en el sector de la construcción, principalmente como aislante térmico y acústico así como en la industria de envases y embalajes teniendo múltiples aplicaciones.

### **2.4.1.- Antecedentes Históricos.**

<sup>11</sup>El EPS fue dado a conocer el 28 de febrero de 1950 por la compañía alemana BASF siendo sus inventores el Dr. Fritz Stastny y Karl Buchholz, investigadores de los laboratorios de la empresa en Ludwigshafen. Más adelante se desarrollarían diversos métodos para la obtención de las perlas y su transformación en productos.

---

<sup>10</sup> CHANDRA S., BERNTSSON L., Lightweight Aggregate Concrete. Suecia: Chalmers University of Technology, 2002, p. 12.

<sup>11</sup> ESPESO J., PEREZ E., El Poliestireno Expandido, Aplicaciones en la Construcción. España: Revista de Plásticos Modernos, 2002.

Posterior a la segunda guerra mundial se encontraron nuevos usos para este material, entre los que destacan la decoración y la aislación. Así, se desarrolló un proceso que permitió la extrusión continua de la espuma. A fines de la década de los cincuenta y hasta los años setenta, se desarrollaron nuevas espumas en base a este plástico tales como espumas moldeadas de estireno expandido, láminas de EPS y cuerpos pequeños de EPS para embalaje.

#### **2.4.2.- Concepto.**

<sup>12</sup>El EPS, se define técnicamente como “material plástico celular y rígido fabricado a partir del moldeo de perlas pre expandidas de EPS o uno de sus copolímeros, la cual presenta una estructura celular cerrada y rellena de aire”.

#### **2.4.3.- Propiedades físicas del EPS.**

##### **2.4.3.1.- Densidad.**

Los productos fabricados con EPS se muestran como materiales espumados de gran ligereza. Dependiendo de la aplicación del EPS, sus densidades varían entre 10 kg/m<sup>3</sup> hasta los 50 kg/m<sup>3</sup>.

##### **2.4.3.2.- Resistencia mecánica.**

Espeso y Pérez (2002) señalan que una propiedad de gran importancia en los materiales de EPS es su estabilidad mecánica. Es relevante destacar que aunque se les considere espumas rígidas, su comportamiento visco-elástico no es igual al de un plástico sólido y rígido. ANAPE (1992) por su parte afirma que la resistencia mecánica de los EPS se debe ser evaluada considerando 4 características:

- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la flexión.
- Resistencia a la tracción.

---

<sup>12</sup> ANAPE. Catálogo General del Poliestireno Expandido. España.

- Resistencia al esfuerzo cortante.

Destacan entre estas características la resistencia a la compresión, la que está directamente relacionada con la densidad del material, siendo importantes también la forma de la celdilla, el tiempo en uso y la temperatura a la que se realiza la prueba.

Esto resulta claro si pensamos que al aumentar la densidad del material, aumenta el grosor de las paredes de las celdillas dentro de las perlas, lo que permite reportar mayor resistencia a la compresión.

<sup>13</sup>El aumento paralelo de la resistencia a la compresión, la densidad del material y el módulo de elasticidad, resultan del cociente entre el valor de la resistencia a la compresión en zona elástica de su deformación.

#### **2.4.3.3.- Tensión de compresión.**

<sup>14</sup>Esta propiedad es requerida en los productos de EPS utilizados principalmente como elementos arquitectónicos, por ser sometidos a carga como suelos, cubiertas, asilamiento perimetral de muros, etc. En la práctica la deformación de EPS en estas aplicaciones sometidas a carga es muy inferior al 10%.

#### **2.4.3.4.- Propiedades de aislamiento térmico.**

<sup>15</sup>Las propiedades de aislamiento térmico al calor y al frío que muestra el EPS son realmente notables, por este motivo no es extraño que sea una de sus aplicaciones más comunes y exploradas por investigadores y asociaciones interesadas.

El EPS se construye con una gran cantidad de esferas de poliestireno soldadas unas con otras y que forman una estructura de geometría muy variada. Las perlas contienen aire

---

<sup>13</sup> GONZALES F: Caracterización de Mezclas de Residuos de Ploiestireno Expandido (EPS) Conglomerados con Yeso o Escayola. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2005, p. 308.

<sup>14</sup> GONZALES F: Caracterización de Mezclas de Residuos de Ploiestireno Expandido (EPS) Conglomerados con Yeso o Escayola. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2005, p. 308.

<sup>15</sup> GONZALES F: Caracterización de Mezclas de Residuos de Ploiestireno Expandido (EPS) Conglomerados con Yeso o Escayola. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2005, p. 308.

en su interior da tal manera que son huecas en un 97-98% de su volumen. El aire atrapado dentro de la estructura funciona como un magnífico aislante térmico.

La densidad de una estructura de plástico determina la conductividad térmica del material. El EPS como otras espumas recibe cuatro atribuciones:

- Conducción en el poliestireno.
- Conducción entre el aire atrapado.
- Convección por el movimiento de las moléculas de aire.
- Radiación a través de las paredes de las celdillas.

<sup>16</sup>Se puede afirmar que como en el caso de otros plásticos celulares, al disminuir la densidad aparente del material, disminuye la conductividad térmica del mismo, sin embargo, a densidades aparentes muy bajas, se presente un incremento de conductividad térmica atribuido al aumento que se produce en la transmisión de calor por el efecto de calor de radiación.

#### **2.4.3.5.- Propiedades de aislamiento acústico.**

<sup>17</sup>Como en otras estructuras poliméricas, la capacidad de aislamiento acústico del EPS depende fundamentalmente de la densidad del poliestireno en la espuma. El EPS absorbe sonido en un rango de frecuencias entre 3500 y 4500 HZ. Para incrementar ese rendimiento el EPS se combina con otros materiales para formar barreras al sonido tipo “sándwich” ya sea con maderas o bien láminas de otros plásticos.

<sup>18</sup>Las espumas de EPS están formadas por cuerpos cerrados y soldados entre sí, por tanto para mejorar sus capacidades de aislamiento acústico conviene favorecer la comunicación de aire entre celdillas. Con este fin se ha desarrollado un proceso de calandrado sobre placas de EPS convencionales, la cual comprime y rompe capas de la estructura para después permitir la recuperación del material casi por completo a su

---

<sup>16</sup> KLEMPNER D., FRISCH K., Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology. Alemania: Hanser Publishers

<sup>17</sup> GONZALES F: Caracterización de Mezclas de Residuos de Poliestireno Expandido (EPS) Conglomerados con Yeso o Escayola. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2005, p. 308.

<sup>18</sup> AAPE. Aislamiento Térmico. Argentina: Productos y Aplicaciones, 2010.

tamaño original. Por otra parte esta técnica también aporta una disminución notable de la rigidez de la espuma.

## **2.5.- POLIESTIRENO EXPANDIDO MODIFICADO.**

### **2.5.1.- Resumen.**

En la vida diaria, espumas de poliestireno expandido (EPS) son ampliamente usadas como material de embalaje, material de construcción y en los aparatos domésticos como en muchos otros. Por otra parte los desechos de EPS causaron gran contaminación en el medioambiente debido a que el mismo no se puede descomponer en la naturaleza. En el presente, la utilización del escombros de EPS en la tecnología de la construcción se está haciendo más común. Es este estudio, el nuevo proceso encontrado para reciclar los escombros de EPS mediante tratamiento térmico, sus características y procesos son descritos en el presente trabajo, así como su proceso experimental. Esta técnica reduce el volumen del EPS hasta en 20 veces de tamaño original. Antes del tratamiento, su densidad promedio, conductividad térmica y resistencia a compresión del escombros de las espumas de EPS son de  $10 \text{ kg/m}^3$ ,  $0,0368 \text{ W/mK}$ , y  $0,12 \text{ MPa}$ , respectivamente. El mejor resultado de modificación fue determinada a  $130^\circ\text{C}$  en un periodo de tiempo de 15 min. Después de la modificación, la densidad, conductividad térmica y resistencia a compresión del escombros de EPS, se incrementó en  $217 \text{ kg/m}^3$ ,  $0,055 \text{ W/mK}$  y  $8,29 \text{ MPa}$  respectivamente. Este nuevo material, que es obtenido mediante el tratamiento térmico, es llamado poliestireno expandido modificado (MEPS).

### **2.5.2.- Introducción.**

Por años, las personas han estado tratando de mantener el medioambiente limpio. Estudios científicos nos proporcionan información de cómo podemos mantener el balance natural de la vida, y el reciclado tiene un rol importante en estos estudios. Por desastres naturales o sobrepoblación y urbanización, grandes cantidades de desperdicios son producidos. Estos desperdicios incluyen hierro, madera, vidrio, cerámicos, goma y EPS. Para realizar el reciclado productivo de estos materiales,

tenemos que separarlos de acuerdo al tipo de material, lo cual es imposible de manejar simplemente como mano de obra, establecer centros complejos de reciclados son necesarios.

Estas facilidades deben ser construidas en lugares que puedan recibir grandes daños luego de desastres naturales o donde no se puede encontrar suficiente materiales para producir menor capital en comparación a los otros costos.

Vale puntualizar que la economía y beneficios medioambientales que se obtiene por reciclar materias primas son inmensos, porque beneficia no sólo al medioambiente sino también a la industria de la construcción en términos de reducción de costos.

Las espumas de EPS sin modificar tienen una estructura celular cerrada en su membrana hecha de poliestireno expandido. El EPS es actualmente usado en el tema de embalaje de todo tipo de artefactos y como aislante térmica en varios campos de la industria en el mundo. Una gran cantidad de EPS es consumido, y dispuesto luego como escombros. Por otra parte, es bien sabido que el escombros de EPS ha causado varios problemas medioambientales, especialmente en el agua y contaminación terrestre, por lo que no se descompone en la naturaleza.

De acuerdo a los resultados de documentos revisados, las espumas de EPS pueden ser reciclados de varias maneras una vez que esta llega al final de su vida. La decisión para su reciclado parte desde la parte técnica, ambiental y consideraciones económicas. Sistemas alternativos usando materiales reciclados contribuyen a la reducción de residuos sólidos y descubrir productos sustentables para la industria del hormigón. No obstante el EPS reciclado no tiene las mismas características de expansión que una espuma virgen y requieren un tratamiento diferente para su elaboración y parece ser viable su uso como un material compuesto.

Se ha observado que el reciclado de EPS posee tres métodos:

- Reducción del volumen del EPS por calor, solventes o fricción, en el cual el poliestireno expandido puede ser recuperado y reusado como material de construcción, etc.
- Reciclado químico para recuperar el monómero del estireno y reutilizarlo como recurso.
- Reciclado térmico, un método efectivo para el escombros contaminante de EPS, el cual puede ser usado como generador de energía a través de la combustión del mismo.

Dentro de lo que es el tratamiento térmico usado para modificar las propiedades del material tanto para endurecer como ablandar; este proceso modifica el comportamiento del EPS de una manera beneficiosa y maximizando su servicio de vida, su dureza, densidad y otras propiedades deseadas como son la absorción del agua y conductividad térmica. El tratamiento térmico es usado a varias industrias para mejorar las propiedades mecánicas de los diferentes desperdicios. Sin embargo, no existía ningún estudio que mejore las propiedades del escombros de EPS mediante este tipo de tratamiento. La mayoría del escombros limpio era reciclado, mientras que las espumas sucias eran dispuestas en botaderos por su bajo grado de reciclado.

Estudios realizados en 1994 mostraron que EPS tratados químicamente y utilizados en concreto, que éste no era afectado por hidróxidos de calcio saturados, soluciones de sulfato de sodio al 10% ni en sulfatos de amonio al 10%, mostrando que los concretos con EPS eran más durables cuando estos están sujetos a ataques de sulfatos y ciclos de congelamiento.

En reportes previos, algunos aditivos que mejoren la unión de las partículas fueron recomendados como las resinas epóxicas o dispersiones acuosas de polivinilos, pero esto generaba un costo mayor para un hormigón obtenido de resistencia muy baja. Donde se pudo concluir que la pérdida de la resistencia se debía a la falta de adhesión entre el agregado de EPS con la pasta, debido a que el EPS sin modificar posee casi nula resistencia.

También pudieron afirmar que el escombros virgen de EPS podía ser usado como un agregado ultraligero para la elaboración tanto de hormigón estructural como no estructural variando las proporciones del mismo en el mortero de hormigón. Sin embargo la baja densidad que posee el EPS y la poca adherencia que mostraba no hizo que se popularizara como agregado.

Por otro lado, el estudio realizado por Kan y Demirboga, un tipo de agregado fue descubierto a partir del escombros de EPS, utilizando un método el cual modificaba favorablemente las propiedades físico-mecánicas y su resistencia a compresión que llega por encima de los 8MPa, por lo que el tratamiento térmico es necesario. No sólo para destruir o reducir el volumen del mismo, sino obtener un material estable para su uso.

La finalidad de este estudio fue el de obtener una fuente extra de agregados livianos y reducir la contaminación ambiental, por esta razón este agregado reciclado fue obtenido del escombros de las espumas de EPS que han sido acopiadas del ambiente.

### **2.5.3.- Programa y Procesamiento Experimental.**

La descripción general de este proceso de modificación se muestra en la siguiente figura:



*Figura 2) 2.2: Proceso de elaboración del MEPS.*  
(Fuente: Kan y Demirboga, 2009)

De manera para investigar el cambio de volumen, densidad, conductividad térmica y resistencia a la compresión por tratamiento térmico Kan y Demirboga prepararon en laboratorio una serie de muestras de sección cubica y otras en forma de placas de dimensiones 50mm x 50mm x 50mm y 300mm x 200mm x 35mm respectivamente, que fueron originalmente cortadas de escombros de EPS proveniente de material de embalaje. Debido al encogimiento al final del tratamiento, todos las muestras de EPS fueron cortados de un mayor tamaño que las dimensiones de un agregado natural.

Todas las muestras de EPS fueron expuestas a diferentes temperaturas tales como 100, 110, 120, 130, 140 y 150°C por periodos de tiempo de 15, 30, 45, 60 y 120 min en un horno eléctrico de control digital, donde fue posible reducir el volumen del EPS desde 1/10 hasta la 1/20 del tamaño original.

Las deformaciones de las espumas de EPS luego del tratamiento térmico se muestran en las siguientes figuras:

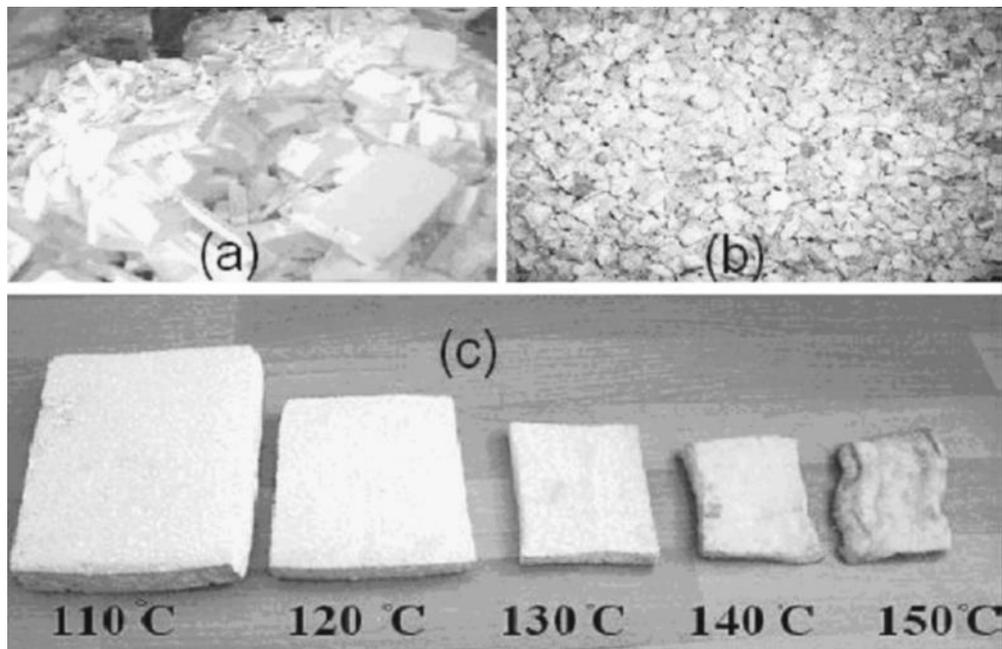


Figura 3) 2.3: (a) Espumas de embalaje; (b) y (c) EPS después del tratamiento térmico.

(Fuente: Kan y Demirboga, 2009)

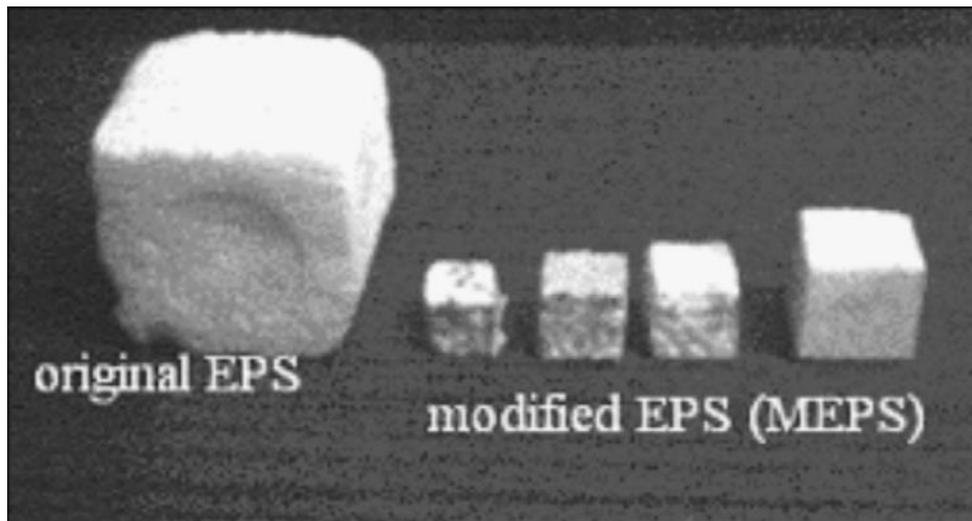


Figura 4) 2.4: Comparación de volúmenes antes y después del tratamiento térmico.

(Fuente: Kan y Demirboga, 2009)

Cuando el escombros de EPS es sometido al tratamiento térmico éste cambia su estructura de un estado espumoso a plástico. Por encima de los 130°C y periodos mayores de exposición a los 15 min la estructura del material era más dura pero frágil.

El cambio de densidad y volumen para las espumas de EPS a diferentes temperaturas por periodos de 15 min pueden ser vistos en las siguientes gráficas:

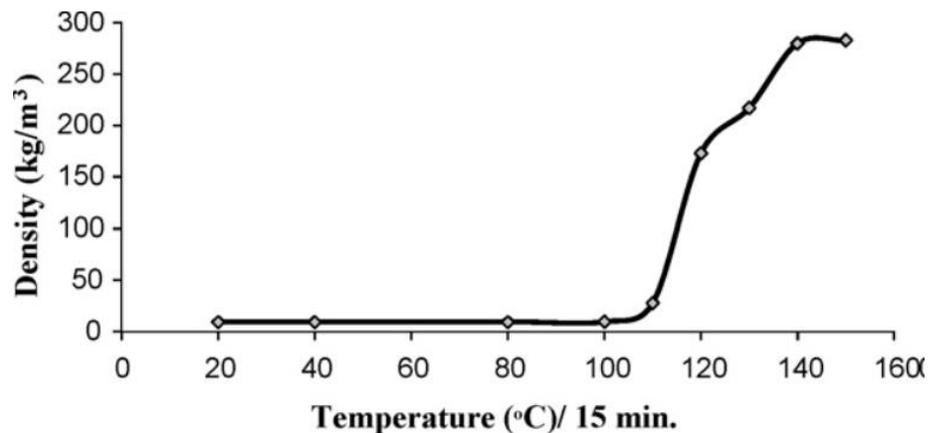


Figura 5) 2.5: Gráfico de variación de densidad vs temperatura.  
(Fuente: Kan y Demirboga, 2009)

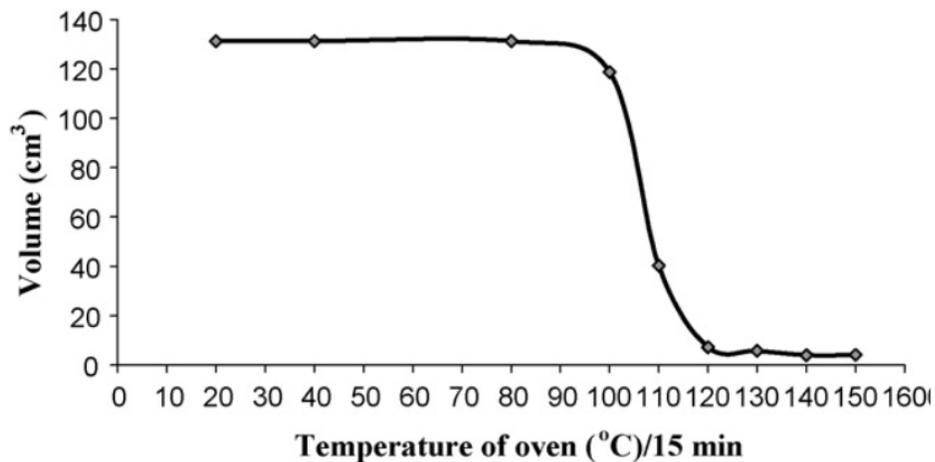


Figura 6) 2.6: Gráfico de volumen vs temperatura.  
(Fuente: Kan y Demirboga, 2009)

El cambio de peso fue evaluado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Cambio de peso y volumen (\%)} = \frac{m_1 * m_2}{m_2} * 100$$

Donde  $m_1$  y  $m_2$  son el peso y el volumen antes y después del tratamiento térmico. Es difícil sugerir alguna relación del cambio de peso a una temperatura de tratamiento específica.

La densidad del EPS era prácticamente constante hasta los 100°C por periodos de 15 min, donde se puede observar que la densidad incrementa con el incremento en la temperatura. A los 110, 120, 130, 140 y 150°C por 15 min la densidad del EPS se incrementa en rangos de 189%, 1700%, 2070%, 3140% y 3130%, respectivamente.

El máximo incremento porcentual se observa a los 120°C, después de esta temperatura in incremento decrece, ésto es debido al punto de fundición del EPS a ese grado, la máxima densidad se obtiene a una temperatura de 140°C, pero la estructura del EPS era cambiada totalmente además que poseían un núcleo fundido; luego de ésto, la densidad se mantenía constante o hasta decrecía un poco.

El cambio del volumen se mantenía constante hasta los 80°C, pero para las temperaturas de 100, 110, 120, 130, 140, 150°C por 15 min, el volumen de EPS decreció en rangos del 8%, 66%, 94%, 95%, 97% y 97%, respectivamente.

#### **2.5.4.- Métodos Utilizados para la Evaluación de las Propiedades del MEPS.**

##### **2.5.4.1.- Resistencia a la compresión del MEPS.**

La resistencia a la compresión del MEPS después del tratamiento térmico fue determinada en especímenes cúbicos sujetos al test estándar de compresión uniaxial al 10% de deformación.

Laukaitis (2005) reportó que cuando la deformación alcanza el 10%, la falla en los especímenes de EPS era aceptable. La siguiente ecuación determina el cambio relativo de la resistencia a compresión:

$$\sigma_R = \left( \frac{\sigma_{MEPS}}{\sigma_{EPS}} \right) * 100$$

Dónde:  $\sigma_R$  = variación de la fuerza de compresión (MPa)

$\sigma_{MEPS}$  = fuerza de compresión del MEPS (MPa)

$\sigma_{EPS}$  = fuerza de compresión del EPS (MPa)

Los resultados pueden ser observados en las siguientes figuras:

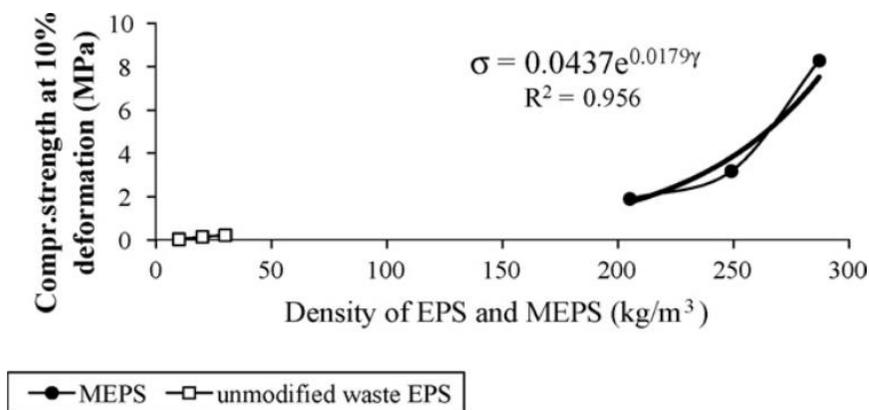


Figura 7) 2.7: Gráfico de la variación de la resistencia a compresión del EPS y MEPS.

(Fuente: Kan y Demirboga, 2009)

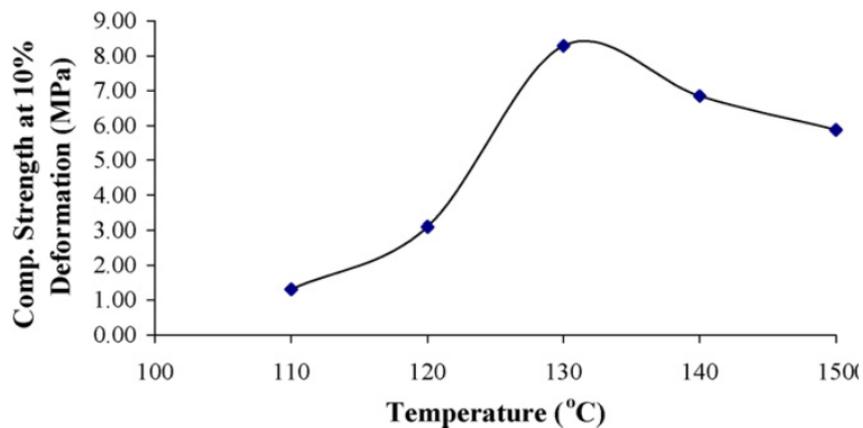


Figura 8) 2.8: Gráfico de la resistencia a compresión del MEPS vs temperatura.

(Fuente: Kan y Demirboga, 2009)

Como se puede observar, la resistencia a compresión se incrementa con el aumento de la temperatura, donde a los 130°C el incremento porcentual es de 6900 y es además el máximo. Después de los 130°C el incremento porcentual de la resistencia del MEPS decrece con el aumento de la temperatura; ésto es debido a la estructura frágil del MEPS a temperaturas más altas.

#### **2.5.4.2.- Absorción de agua, densidad y ciclo de congelamiento.**

El MEPS no absorbe el agua debido a su estructura interna, consiste en millones de células completamente cerradas con baja porosidad. La absorción y la densidad seca del conjunto de muestras de MEPS fueron medidas según la norma de Turquía TS-EN 1097-6 (2000). La proporción de absorción del conjunto de MEPS fue calculada tanto por el peso como por métodos volumétricos en muestras de 4 a 16 mm, observándose que los valores de la absorción son muy inferiores en comparación a la gran mayoría de los agregados livianos (LWA). La absorción de agua del conjunto de MEPS era de 4,1% (por peso) y de 0,58% (por volumen).

#### **2.5.5.- Comparación de las Propiedades Físico-Mecánicas entre el EPS y el MEPS.**

Dentro de la investigación que realizaron Kan y Demirboga presentan una tabla comparativa entre las propiedades físico-mecánicas más importantes entre el EPS y el MEPS y así poder observar de mejor manera las bondades que genera el tratamiento térmico a este material.

*Tabla 1) 2.1: Tabla comparativa de las propiedades entre EPS y MEPS.*

Propiedades	EPS	MEPS
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	10	217
Resistencia a compresión (MPa)	0,12	8,29
Conductividad Térmica (W/mK)	0,0369	0,0555
Absorción porcentual por volumen	< 3	0,58

(Fuente: Kan y Demirboga, 2009)

## **2.6.- AGREGADOS.**

Los agregados pueden ser naturales y artificiales, siendo los naturales de uso frecuente, además los agregados pueden ser clasificados en: agregado grueso y fino.

**Agregado grueso.-** Es aquel que queda retenido en el tamiz N°4 y proviene de la desintegración de las rocas; puede a su vez clasificarse en grava y piedra chancada.

**Agregado fino.-** Se define como aquel que pasa el tamiz 3/8" y queda retenido en el tamiz N°200, el más usual es la arena resultante de la desintegración de las rocas.

La influencia de estos materiales en las propiedades del hormigón tiene efectos importantes no solo en el acabado y la calidad final, sino también en la trabajabilidad en la consistencia en su estado plástico, durabilidad y resistencia.

Los agregados conforman el esqueleto granular del concreto y son el elemento mayoritario que representa el 80-90% del peso total del hormigón.

## **2.7.- CEMENTO.**

El cemento utilizado fue cemento portland IP-30, de cemento El Puente, producto certificado que cumple con las exigencias de la Normativa Boliviana NB-011 y la Norma Americana ACI 318-05, la cual fue utilizada para la realización de la presente investigación.

Cemento puzolanico de resistencia media a compresión de 30 MPa a los 28 días, se caracteriza por su menor calor de hidratación, menor figuración, menor retracción térmica y menor reacción álcali/agregado.

Recomendado para hormigón armado estructural, prefabricados, hormigones en masa, hormigones con áridos reactivos, hormigones en ambientes agresivos, y en general todo tipo de construcciones.

## **2.9.- AGUA DE AMASADO.**

El agua debe cumplir con las condiciones básicas, las mismas requeridas para la construcción de cualquier tipo de hormigón, no deben contener material orgánico, sustancias químicas como sales y azúcares, etc.

En la elaboración del mortero de hormigón se utilizó el agua potable del Laboratorio de Suelos y Hormigones de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la U.A.J.M.S., ya que la misma proviene de la red pública y que cumple con requisitos de Ph, dureza, sólidos en suspensión, etc.

## **2.10.- ENSAYOS DE LABORATORIO.**

### **2.10.1.- Caracterización de los Agregados.**

#### **2.10.1.1.- Tamizado y granulometría.**

Este método establece el procedimiento de tamizar y obtener la distribución porcentual de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido.

Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Los equipos utilizados fueron los siguientes:

- Balanza de precisión de 0,1 gr.
- Tamices de alambre y abertura cuadrada, donde el tamaño numeral esta normada por IBNORCA.
- Horno.
- Herramientas y accesorios.

Expresión gráfica de la granulometría se muestra en un sistema ortogonal cuya abscisa, a escala logarítmica, indica las aberturas nominales y cuya ordenada, a escala lineal, indica los valores de granulometría.

Este ensayo fue realizado siguiendo la Norma ASTM C-136 y AASHTO T-27, la cual establece los índices de los materiales de origen pétreo tanto granular y fino.

#### **2.10.1.2.- Masa específica aparente.**

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad aparente compactada y suelta de los áridos.

Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Los equipos y materiales utilizados fueron los siguientes:

- Balanza de precisión de 0,1 gr.
- Horno.
- Varilla pisón.
- Medidas.

Tabla 2) Tamaño del molde en función al tamaño máximo nominal de agregado.

Tamaño Máximo Nominal de áridos (mm)	Capacidad Volumétrica		Diámetro Interior (mm)	Altura Interior (mm)	Espesor mínimo del metal	
	m <sup>3</sup>	l			Base (mm)	Pared (mm)
16	0,003	3	155 ± 2	160 ± 2	5	2,5
25	0,010	10	205 ± 2	305 ± 2	5	2,5
50	0,015	15	255 ± 2	295 ± 2	5	3,0
100	0,030	30	355 ± 2	305 ± 2	5	3,0

(Fuente: Manual de la ABC para ensayos en pavimentos y hormigones)

- Herramientas y accesorios.

Este ensayo fue realizado siguiendo las Normas ASTM E-30 y ASTM C-29, la cual establece índices para los agregados de origen pétreo granular y fino.

### 2.10.1.3.- Densidad real, neta, y absorción de agua en áridos gruesos.

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Los equipos y materiales utilizados fueron los siguientes:

- Balanza de precisión de 1 gr.
- Horno.
- Canastillo porta muestra.
- Estanque.
- Recipientes.

Cantidad mínima de la muestra según el tamaño máximo nominal del árido.

Tabla 3) 2.3: Cantidad de mínima de muestra para ser ensayada.

Tamaño máximo nominal (mm)	Cantidad mínima de muestra (g)
12,5 (1/2)	2.000
19 (3/4)	3.000
25,0 (1")	4.000
37,5 (1 1/2")	5.000
50 (2")	8.000

(Fuente: Manual de la ABC para ensayos en pavimentos y hormigones)

Este ensayo fue realizado siguiendo las indicaciones de las Normas ASTM C-127 y AASHTO T-85.

#### **2.10.1.4.- Densidad real, neta, y absorción de agua en áridos finos.**

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en áridos finos.

Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de hormigones y obras asfálticas.

Los equipos y materiales utilizados fueron los siguientes:

- Balanza de precisión de 0,1 gr.
- Horno.
- Recipientes.
- Matraz.
- Molde.
- Piso.

Este ensayo fue realizado siguiendo las indicaciones de las normas ASTM C-128 y AASHTO T-84.

## **2.10.2.- Ensayos al Hormigón.**

### **2.10.2.1.- Determinación de la docilidad mediante Cono de Abrams.**

Este método define el procedimiento para determinar la docilidad del hormigón fresco, tanto en laboratorio como en obra, mediante el asentamiento que experimenta en el Cono de Abrams

El procedimiento es aplicable a hormigones preparados con áridos de tamaño máximo absoluto de 50 mm. Es válido para establecer la docilidad de hormigones frescos con asentamientos comprendidos entre los 2 a 18 cm.

Definición de docilidad: Expresa la facilidad del hormigón fresco para ser transportado, colocado y compactado sin que se produzca segregación.

Los equipos y materiales utilizados fueron los siguientes:

- Molde.
- Varilla pisón.
- Plancha de apoyo.
- Embudo.
- Pala de llenado.

Este ensayo fue realizado siguiendo las indicaciones de las normas ASTM C-143 y AASHTO T-119 para las muestras de hormigón en su estado fresco.

### **2.10.2.2.- Elaboración y curado en laboratorio de las muestras.**

Este método establece los procedimientos para preparar mezclas de prueba de hormigón en laboratorio.

Es aplicable a mezclas que se emplean en ensayos del hormigón fresco y en la confección de probetas para ensayos del hormigón endurecido con los propósitos de: verificar la calidad de los materiales componentes y su correcta dosificación, investigar procedimientos de elaboración y ensayos e investigar propiedades y características del hormigón.

Los equipos y materiales utilizados fueron los siguientes:

- Recipientes.
- Balanzas.
- Mezclador.
- Probetas cilíndricas de acuerdo a especificación ASTM C-470.

### **Curado.**

Después del acabado para evitar la evaporación de agua del concreto sin endurecer, los testigos deben ser cubiertos inmediatamente después de su acabado, preferiblemente con una platina no reactiva al concreto, o con una lámina plástica dura e impermeable. Se permite el uso de lona húmeda para cubrir, pero se evitara el contacto directo de la muestra con la lona, la cual debe permanecer húmeda durante 24 horas contadas a partir del acabado de la muestra.

### **Extracción de muestras.**

Las muestras deben ser removidas de sus moldes en un tiempo no menor de 20 horas ni mayor de 48 horas después de su elaboración cuando no se emplean aditivos.

### **Ambiente de curado.**

- Se deben mantener las muestras en condiciones de humedad con temperatura de  $23 \pm 2$  °C desde el momento del moldeo hasta el momento del ensayo.
- El almacenamiento durante las primeras 48 horas de curado debe hacerse en un medio libre de vibraciones.
- La condición de humedad debe lograrse por inmersión de la muestra sin el molde en agua.
- No deben exponerse los especímenes a condiciones de goteo o de corrientes de agua.
- Debe evitarse que se sequen las paredes de la muestra luego del periodo de curado.

- La elaboración y curado de las muestras de hormigón fue realizado siguiendo las indicaciones de las normas ASTM 192 y AASHTO T-126.

### **2.10.2.3.- Determinación de la resistencia a compresión.**

Este método establece el procedimiento para efectuar el ensaye a la rotura por compresión de probetas cubicas y cilíndricas de hormigón.

Los equipos y materiales utilizados fueron los siguientes:

- Prensa hidráulica
- Regla graduada.
- Balanza de precisión de 1 gr.

#### **Recomendaciones:**

- La superficie de aplicación de la carga serán lisas y planas, y no se aceptaran desviaciones con respecto al plano superiores a 0,015 mm en 100 mm medidos en cualquier dirección.
- La dimensión de la arista o del diámetro de las placas planas de carga será igual o superior a la arista o diámetro de la probeta.
- La sensibilidad de la prensa será tal que la menor división de la escala de lectura sea inferior o igual al 1% de la carga máxima.
- Al momento de aplicar la carga de debe alcanzar la franca de rotura de la probeta en un tiempo igual o superior a 100 s.
- La prensa hidráulica no debe superar la velocidad de 0,35 N/mm<sup>2</sup>/s.

La determinación de la resistencia a compresión de probetas cilíndricas se realizó siguiendo las normas ASTM C-39 y AASHTO T-22.

Las probetas en su estado fresco fueron enrasadas para dejar un mejor acabado y así se ejecute de mejor forma el ensayo y exista una mejor distribución de cargas al usar la prensa hidráulica del laboratorio.

### **2.11.- DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN PATRÓN.**

La dosificación del hormigón patrón que serviría para la confección de todas las muestras se realizó mediante el método de la Norma Americana ACI-211, la misma se realizó con una hoja de cálculo facilitada por la Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ingeniería, La Paz – Bolivia.

Se utilizó una dosificación de hormigón H-25 ( $250 \text{ kg/cm}^2$ ), debido a que al ser una mezcla con una cantidad generosa de cemento, planteando la hipótesis de durabilidad en el tiempo además de la eventual pérdida de resistencia en función al reemplazo gradual de los agregados de origen pétreo.

Las dosificaciones experimentales fueron desarrolladas dejando constante la relación agua/cemento en los casos donde se realizó el reemplazo parcial del agregado granular y fino por MEPS.

La elaboración del hormigón fue realizada en una mezcladora facilitada por el Laboratorio de Suelos y Hormigones de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la U.A.J.M.S., la misma posee baja revolución y velocidad constante y capacidad de 120 lts.

## **CAPÍTULO 3.- MARCO PRÁCTICO.**

### **3.1.- INTRODUCCIÓN.**

El presente capítulo tiene como objetivo describir los materiales, equipos, normas y métodos utilizados en la realización de la experiencia, con el fin de obtener la resistencia característica a compresión de hormigones livianos estructurales usando como agregado poliestireno expandido modificado mediante tratamiento térmico en diferentes dosificaciones.

Los datos principales serán obtenidos mediante ensayos de compresión por rotura de probetas cilíndricas estandarizadas.

Se utilizó una dosificación de hormigón H-25 al cual se reemplazó con MEPS en diferentes proporciones con tamaño máximo nominal de 1". Estos agregados fueron elaborados utilizando como materia prima escombros de EPS de obras de construcción de la región.

### **3.2.- MATERIALES Y ENSAYOS A REALIZAR.**

#### **3.2.1.- Cemento.**

El cemento utilizado fue cemento portland IP-30, de cemento El Puente, producto certificado que cumple con las exigencias de la Normativa Boliviana NB-011 y la Norma Americana ACI 318-05, la cual fue utilizada para la realización de la presente investigación.

#### **3.2.2.- Áridos.**

Se utilizó grava natural de tamaño máximo nominal de 1" y arena natural con módulo de finura medio, los cuales son de originarios de la región (Río Guadalquivir), comprada de la seleccionadora Segovia ubicada en el barrio de San Blas, los agregados al no ser libres de impurezas de materia orgánica, se procedió a su respectivo lavado.

### 3.2.3.- Agua.

En la elaboración del mortero de hormigón se utilizó el agua potable del Laboratorio de Suelos y Hormigones de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la U.A.J.M.S., ya que la misma proviene de la red pública y que cumple con requisitos de Ph, dureza, sólidos en suspensión, etc.

### 3.2.4.- Poliestireno Expandido Modificado.

El EPS fue adquirido en una obra de gran envergadura de la ciudad de Tarija la cual contaba con una generosa cantidad de escombros, la misma fue facilitada a costo nulo.

Otra porción del EPS fue comprada a la fábrica PLASTARIJA debido a que en obras de la región el material era eliminado por contacto al fuego o botado al río según averiguaciones con obreros.

Las perlititas de EPS que se utilizarían para remplazo del agregado fino fue facilitado a costo nulo de la fábrica PLASTARIJA, porque el mismo no era reciclado en las instalaciones.



*Figura 9) 3.1: EPS recolectado para la elaboración de MEPS.  
(Fuente: Elaboración Propia)*



*Figura 10) 3.2: EPS recolectado para la elaboración de MEPS fino.*  
(Fuente: Elaboración Propia)

El EPS fue triturado y luego puesto en un horno industrial eléctrico a una temperatura de 130°C durante 15 minutos, debido a que según los estudios de Kan y Demirboga a esta temperatura por ese periodo de tiempo se logra obtener el máximo esfuerzo a compresión axial del MEPS.



*Figura 11) 3.3: Horno eléctrico utilizado para tratar el EPS.*  
(Fuente: Elaboración Propia)



*Figura 12) 3.4: Muestra de EPS previo tratamiento térmico.*  
(Fuente: Elaboración Propia)



*Figura 13) 3.5: Muestra de EPS después del tratamiento térmico.*  
(Fuente: Elaboración Propia)



*Figura 14) 3.6: Muestra de EPS fino (izq.) y MEPS fino (dcha.)*  
(Fuente: Elaboración Propia)

Al retirar los MEPS del horno, estos tenían una consistencia blanda debido a la temperatura a la que se encontraban, lo cual se modificó a medida que se enfrió el material, adquiriendo la rigidez final necesaria para que puedan ser utilizados como reemplazo de los agregados pétreos.

Para finalizar el proceso de fabricación, se debió separar el material de forma manual ya que los MEPS tendían a adherirse entre sí en los puntos de contacto, formando conglomerados como se observan en la figura.

Una vez obtenido el material se procedió a determinar su porcentaje de reducción lineal y volumétrica, así como los pesos específicos antes y después del tratamiento térmico,

el que se realizó midiendo 4 muestras de geometría cubica antes y después del tratamiento. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 4) 3.1: Reducción de muestras y densidad luego del tratamiento térmico.*

Dimensión	Medida antes del tratamiento (cm)	Medida después del tratamiento (cm)	Porcentaje de reducción lineal (%)	Porcentaje de reducción volumétrica (%)	P.E. EPS (kg/m <sup>3</sup> )	P.E. MEPS (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Muestra 1</b>						
x	8	2,9	64%	96%	10	232
y	7,8	2,5	68%			
z	7,6	2,8	63%			
<b>Muestra 2</b>						
x	7,8	2,7	65%	96%	10	233
y	7,9	2,7	66%			
z	8	2,8	65%			
<b>Muestra 3</b>						
x	7,8	2,4	69%	96%	9	226
y	8,2	2,8	66%			
z	7,8	2,9	63%			
<b>Muestra 4</b>						
x	8	2,8	65%	96%	10	217
y	7,8	2,7	65%			
z	7,9	2,7	66%			

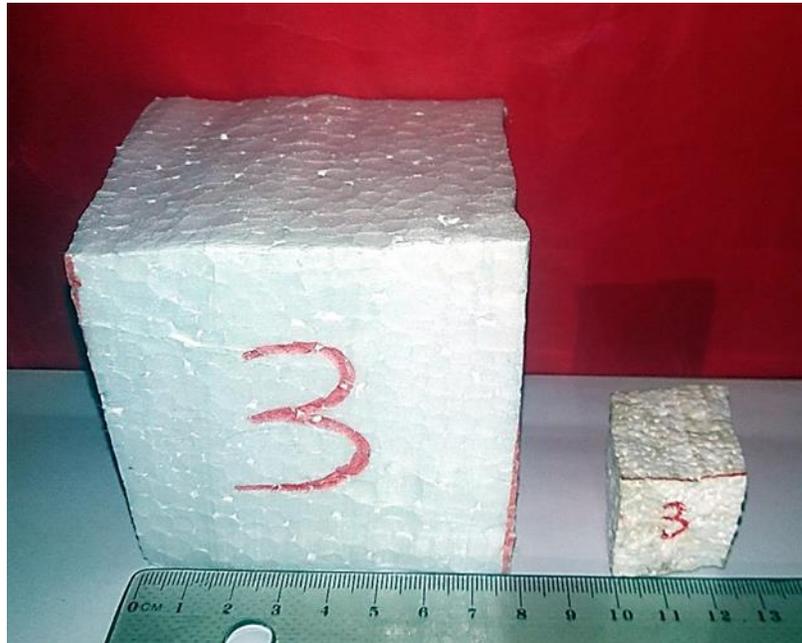
(Fuente: Elaboración Propia)



*Figura 15) 3.7: Reducción del volumen y aumento del peso específico del EPS.  
(Fuente: Elaboración Propia)*



*Figura 16) 3.8: Reducción del volumen y aumento del peso específico del EPS.  
(Fuente: Elaboración Propia)*



*Figura 17) 3.9: Reducción del volumen y aumento del peso específico del EPS.  
(Fuente: Elaboración Propia)*



*Figura 18) 3.10: Reducción del volumen y aumento del peso específico del EPS.  
(Fuente: Elaboración Propia)*

Los resultados obtenidos, muestran que el porcentaje de reducción lineal promedio (aproximado) experimentado por el EPS luego del tratamiento térmico es del 65%, mientras que el cambio volumétrico promedio (aproximado) es del 96%.

El peso específico del MEPS promedio fue de 227 kg/m<sup>3</sup> (aproximado), si vamos a la gráfica de la investigación de Kan y Demirboga podemos observar que nuestro resultado se ajusta a los valores de la misma.

Los porcentajes de reducción fueron determinados por la siguiente formula:

$$\Delta\% = \frac{\theta_i - \theta_f}{\theta_i} * 100 \quad (\text{ec.3.1})$$

Dónde:  $\Delta\%$  = variación porcentual lineal o volumétrica del objeto a estudio

$\theta_i$  = magnitud lineal o volumétrica del objeto a estudio (cm)

$\theta_f$  = magnitud lineal o volumétrica del objeto después del tratamiento térmico  
(cm)

### **3.2.5.- Caracterización de los Agregados.**

#### **3.2.5.1.- Tamizado y granulometría.**

Este ensayo fue realizado siguiendo la Normas ASTM C-136 y AASHTO T-27, la cual establece los índices de los materiales de origen pétreo tanto granular y fino.

#### **3.2.5.2.- Masa específica aparente.**

Este ensayo fue realizado siguiendo las Normas ASTM E-30 y ASTM C-29, la cual establece índices para los agregados de origen pétreo granular y fino.

### **3.2.5.3.- Densidad real, neta, y absorción de agua.**

Este ensayo fue realizado siguiendo las indicaciones de las Normas ASTM C-127 y AASHTO T-85 para el agregado granular y las normas ASTM C-128 y AASHTO T-84 para el agregado fino.

### **3.2.6.- Ensayos en el Hormigón.**

#### **3.2.6.1.- Determinación de la docilidad mediante el Cono de Abrams.**

Este ensayo fue realizado siguiendo las indicaciones de las Normas ASTM C-143 y AASHTO T-119 para las muestras de hormigón en su estado fresco.



*Figura 19) 3.11: Determinación de la docilidad - Cono de Abrams.*  
(Fuente: Elaboración Propia)

#### **3.2.6.2.- Elaboración y curado de las muestras.**

La elaboración y curado de las muestras de hormigón fue realizado siguiendo las indicaciones de las Normas ASTM 192 y AASHTO T-126.



*Figura 20) 3.12: Curado de probetas.*  
(Fuente: Elaboración Propia)

### **3.2.6.3.- Determinación de la resistencia a compresión.**

La determinación de la resistencia a compresión de probetas cilíndricas se realizó siguiendo las normas ASTM C-39 y AASHTO T-22.

Las probetas en su estado fresco fueron enrasadas para dejar un mejor acabado y así se ejecute de mejor forma el ensayo y exista una mejor distribución de cargas al usar la prensa hidráulica del laboratorio.



*Figura 21) 3.13: Prensa hidráulica para ensayos de compresión.*  
(Fuente: Elaboración Propia)

### 3.3.- ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS.

La dosificación fue realizada por peso para obtener el volumen total de material necesario para la confección de las probetas y el reemplazo del agregado granular y fino por MEPS fue en volumen.



*Figura 22) 3.14: Reemplazo volumétrico del agregado grueso de MEPS.*  
(Fuente: Elaboración Propia)



*Figura 23) 3.15: Reemplazo volumétrico del agregado fino de MEPS.*  
(Fuente: Elaboración Propia)

Los materiales fueron mezclados durante 8 min siendo agregados en la mezcladora en el siguiente orden:

- Grava y/o MEPS granular.
- Agua.
- Cemento.
- Arena y MEPS fino.



*Figura 24) 3.16: Mezcladora utilizada para la dosificación de los hormigones.*  
(Fuente: Elaboración Propia)

Se verificó su la docilidad y trabajabilidad plástica de cada una de las mezclas mediante el método del Cono de Abrams donde se esperaba un asentamiento de 5 cm, parámetro que fue delimitado en la dosificación de nuestro hormigón.

Para finalizar el trabajo con el hormigón en su estado fresco, se procedió a al llenado de las probetas, realizado en tres capas y con la varilla se ejecutaron 25 golpes por capa, y de esta forma evitar la formación de cangrejas y burbujas de aire, garantizado la correcta distribución de la mezcla en todo el volumen de la probeta.

En los casos donde el reemplazo de MEPS era significativo, se tuvo mucho cuidado en cuento a la energía usada con la varilla y el combo de goma, debido a que por ser el material con densidad más baja, el material tendía flotar y observarse porciones del mismo en la superficie libre.



*Figura 25) 3.17: Probetas después de su acabado y curado.*  
(Fuente: Elaboración Propia)

Al final, el desmolde y curado de las probetas se realizó a las 48 hrs. posteriores al vaciado.

## CAPÍTULO 4.- RESULTADOS.

### 4.1.- CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS.

La serie de tablas presenta la clasificación de probetas de acuerdo a su dosificación, su relación agua/cemento y cantidad en litros aproximado del reemplazo volumétrico del agregado granular y fino de MEPS.

*Tabla 5) 4.1: Clasificación de probetas: dosificación y razón a/c serie H°P.*

Tipo de hormigón		Cemento (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Razón a/c	MEPS (lts aprox.)	MEPS Fino (lts aprox.)
H° Patrón	H°P1	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-
	H°P2	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-
	H°P3	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-
	H°P4	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-
	H°P5	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-
	H°P6	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-
	H°P7	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-
	H°P8	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-
	H°P9	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-
	H°P10	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-
	H°P11	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-
	H°P12	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-
	H°P13	9,2	28,62	19,42	0,533	-	-

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 6) 4.2: Clasificación de probetas: dosificación y razón a/c serie H°40.

Tipo de hormigón	Cemento (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Razón a/c	MEPS (Its aprox.)	MEPS Fino (Its aprox.)	
H° 40% MEPS y 5% MEPS Fino	H°40-1	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55
	H°40-2	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55
	H°40-3	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55
	H°40-4	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55
	H°40-5	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55
	H°40-6	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55
	H°40-7	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55
	H°40-8	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55
	H°40-9	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55
	H°40-10	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55
	H°40-11	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55
	H°40-12	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55
	H°40-13	9,2	17,17	18,45	0,533	2,56	0,55

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 7) 4.3: Clasificación de probetas: dosificación y razón a/c serie H°60.

Tipo de hormigón	Cemento (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Razón a/c	MEPS (Its aprox.)	MEPS Fino (Its aprox.)	
H° 60% MEPS y 5% MEPS Fino	H°60-1	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55
	H°60-2	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55
	H°60-3	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55
	H°60-4	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55
	H°60-5	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55
	H°60-6	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55
	H°60-7	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55
	H°60-8	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55
	H°60-9	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55
	H°60-10	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55
	H°60-11	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55
	H°60-12	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55
	H°60-13	9,2	11,45	18,45	0,533	5,75	0,55

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 8) 4.4: Clasificación de probetas: dosificación y razón a/c serie H°80.

Tipo de hormigón		Cemento (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Razón a/c	MEPS (lts aprox.)	MEPS Fino (lts aprox.)
H° 80% MEPS y 5% MEPS Fino	H°80-1	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55
	H°80-2	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55
	H°80-3	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55
	H°80-4	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55
	H°80-5	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55
	H°80-6	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55
	H°80-7	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55
	H°80-8	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55
	H°80-9	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55
	H°80-10	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55
	H°80-11	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55
	H°80-12	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55
	H°80-13	9,2	5,72	18,45	0,533	10,22	0,55

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 9) 4.5: Clasificación de probetas: dosificación y razón a/c serie H°100.

Tipo de hormigón		Cemento (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Razón a/c	MEPS (lts aprox.)	MEPS Fino (lts aprox.)
H° 100% MEPS y 0% MEPS Fino	H°100-1	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-
	H°100-2	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-
	H°100-3	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-
	H°100-4	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-
	H°100-5	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-
	H°100-6	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-
	H°100-7	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-
	H°100-8	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-
	H°100-9	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-
	H°100-10	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-
	H°100-11	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-
	H°100-12	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-
	H°100-13	9,2	-	19,42	0,533	15,97	-

(Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.2.- RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

Las series de tablas representan los resultados de los ensayos a compresión axial y su peso específico.

La serie H°Patrón presenta probetas realizadas sin presencia de poliestireno expandido modificado, de modo de obtener un patrón de resistencias con un hormigón convencional. Se realizaron ensayos a los 7, 14 y 28 días para obtener y visualizar la curva en la evolución de la resistencia en el tiempo.

Tabla 10) 4.6: Resultados de ensayo a compresión axial serie H°P.

Tipo de hormigón		Peso testigo (gr)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia Axial a los 7 días (MPa)	Resistencia Axial a los 14 días (MPa)	Resistencia Axial a los 28 días (MPa)
H° Patrón	H°P1	13165	2483	20,28	-	-
	H°P2	13165	2483	20,46	-	-
	H°P3	13155	2481	19,9	-	-
	H°P4	13095	2470	20,31	-	-
	H°P5	13185	2487	-	23,4	-
	H°P6	13195	2489	-	23,31	-
	H°P7	13150	2480	-	23,11	-
	H°P8	13110	2473	-	23,42	-
	H°P9	13080	2467	-	-	26,89
	H°P10	13157	2482	-	-	27,22
	H°P11	13175	2485	-	-	27,11
	H°P12	13180	2486	-	-	26,95
	H°P13	13098	2471	-	-	27,3
Promedio			2480	20	23	27

(Fuente: Elaboración Propia)

La serie H°40 presenta probetas con una presencia de un 40 % de MEPS Granular y un 5% de MEPS Fino.

Se realizaron ensayos a los 7, 14 y 28 días para obtener y visualizar la curva en la evolución de la resistencia en el tiempo.

*Tabla 11) 4.7: Resultados del ensayo a compresión axial de la serie H°40.*

Tipo de hormigón		Peso testigo (gr)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia Axial a los 7 días (MPa)	Resistencia Axial a los 14 días (MPa)	Resistencia Axial a los 28 días (MPa)
H° 40% MEPS	H°40-1	11025	2080	14,51	-	-
	H°40-2	10760	2030	14,42	-	-
	H°40-3	10655	2010	14,65	-	-
	H°40-4	10850	2047	13,8	-	-
	H°40-5	10945	2065	-	16,17	-
	H°40-6	10585	1997	-	16,65	-
	H°40-7	11110	2096	-	16,35	-
	H°40-8	10990	2073	-	15,25	-
	H°40-9	11195	2112	-	-	20,55
	H°40-10	11755	2217	-	-	20,13
	H°40-11	10750	2028	-	-	20,35
	H°40-12	10950	2065	-	-	19,75
	H°40-13	10880	2052	-	-	20,67
Promedio			2067	14	16	20

(Fuente: Elaboración Propia)

La serie H°60 presenta probetas con una presencia de un 60 % de MEPS Granular y un 5% de MEPS Fino.

Se realizaron ensayos a los 7, 14 y 28 días para obtener y visualizar la curva en la evolución de la resistencia en el tiempo.

*Tabla 12) 4.8: Resultados del ensayo a compresión axial de la serie H°60.*

Tipo de hormigón		Peso testigo (gr)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia Axial a los 7 días (MPa)	Resistencia Axial a los 14 días (MPa)	Resistencia Axial a los 28 días (MPa)
H° 60% MEPS	H°60-1	10110	1907	11,56	-	-
	H°60-2	9770	1843	11,25	-	-
	H°60-3	10124	1910	11,1	-	-
	H°60-4	10254	1934	10,95	-	-
	H°60-5	10095	1904	-	14,05	-
	H°60-6	10110	1907	-	12,63	-
	H°60-7	9890	1866	-	13,55	-
	H°60-8	9995	1885	-	13,75	-
	H°60-9	10165	1917	-	-	18,54
	H°60-10	10325	1948	-	-	18,68
	H°60-11	10305	1944	-	-	18,91
	H°60-12	10310	1945	-	-	17,9
	H°60-13	10113	1908	-	-	17,65
Promedio			1909	11	13	18

(Fuente: Elaboración Propia)

La serie H°80 presenta probetas con una presencia de un 80 % de MEPS Granular y un 5% de MEPS Fino.

Se realizaron ensayos a los 7, 14 y 28 días para obtener y visualizar la curva en la evolución de la resistencia en el tiempo.

*Tabla 13) 4.9: Resultados del ensayo a compresión axial de la serie H°80.*

Tipo de hormigón		Peso testigo (gr)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia Axial a los 7 días (MPa)	Resistencia Axial a los 14 días (MPa)	Resistencia Axial a los 28 días (MPa)
H° 80% MEPS	H°80-1	9065	1710	6,87	-	-
	H°80-2	8835	1667	6,54	-	-
	H°80-3	9035	1704	6,51	-	-
	H°80-4	9047	1707	5,96	-	-
	H°80-5	9485	1789	-	7,61	-
	H°80-6	9070	1711	-	8,15	-
	H°80-7	9035	1704	-	7,77	-
	H°80-8	8998	1697	-	7,24	-
	H°80-9	8770	1654	-	-	14,17
	H°80-10	9035	1704	-	-	14,26
	H°80-11	9120	1720	-	-	13,41
	H°80-12	9110	1718	-	-	13,67
	H°80-13	9010	1700	-	-	13,45
Promedio			1707	6	7	13

(Fuente: Elaboración Propia)

La serie H°100 presenta probetas con una presencia de un 100 % de MEPS Granular y 0% de MEPS Fino, este último debido a que al reemplazar todo el agregado grueso le estamos quitando gran porcentaje de la resistencia y vimos conveniente mantener sin alteraciones la totalidad del agregado fino de origen pétreo.

Se realizaron ensayos a los 7, 14 y 28 días para obtener y visualizar la curva en la evolución de la resistencia en el tiempo.

*Tabla 14) 4.10: Resultados del ensayo a compresión axial de la serie H°100.*

Tipo de hormigón		Peso testigo (gr)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia Axial a los 7 días (MPa)	Resistencia Axial a los 14 días (MPa)	Resistencia Axial a los 28 días (MPa)
H° 100% MEPS	H°100-1	7910	1492	5,11	-	-
	H°100-2	7990	1507	5,47	-	-
	H°100-3	7788	1469	5,23	-	-
	H°100-4	7756	1463	5,31	-	-
	H°100-5	7785	1468	-	5,79	-
	H°100-6	7832	1477	-	5,81	-
	H°100-7	7861	1483	-	5,71	-
	H°100-8	7975	1504	-	5,43	-
	H°100-9	7875	1485	-	-	6,12
	H°100-10	7947	1499	-	-	5,9
	H°100-11	7756	1463	-	-	5,87
	H°100-12	7810	1473	-	-	6,24
	H°100-13	7983	1506	-	-	6,18
Promedio			1484	5	5	6

(Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.3.- REDUCCIÓN DEL PESO ESPECÍFICO Y DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN AXIAL.

La tabla presenta los resultados comparativos, de los porcentajes de reducciones del peso específico, y de los porcentajes de pérdidas relativas de la resistencia a compresión axial.

*Tabla 15) 4.11: Pérdida del peso específico y pérdida de la resistencia a compresión axial de las series.*

Serie	Día de Ensayo	Peso Específico Promd. (kg/m <sup>3</sup> )	Pérdida de Masa (%)	Resistencia Promedio a Compresión (MPa)	Pérdida de Resistencia a Compresión (%)
H°P	7	2480	-	20	-
H°40	7	2067	17%	14	29%
H°60	7	1909	23%	11	45%
H°80	7	1707	31%	6	68%
H°100	7	1484	40%	5	74%
H°P	14	2480	-	23	-
H°40	14	2067	17%	16	31%
H°60	14	1909	23%	13	42%
H°80	14	1707	31%	7	70%
H°100	14	1484	40%	5	79%
H°P	28	2480	-	27	-
H°40	28	2067	17%	20	25%
H°60	28	1909	23%	18	32%
H°80	28	1707	31%	13	52%
H°100	28	1484	40%	6	78%

(Fuente: Elaboración Propia)

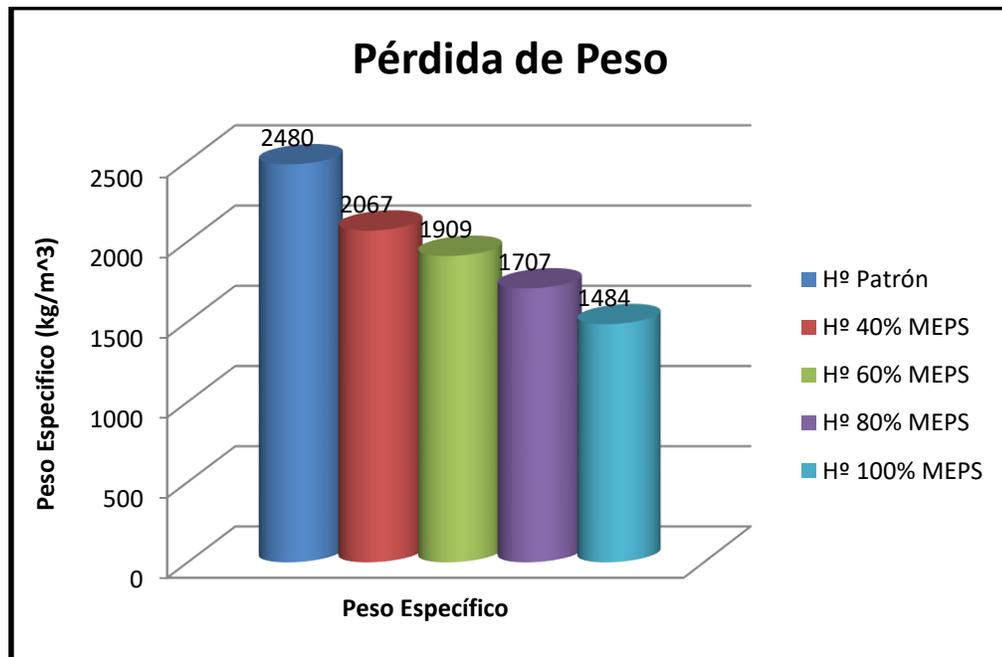


Figura 26) 4.1: Pérdida del peso específico por series.  
(Fuente: Elaboración Propia)

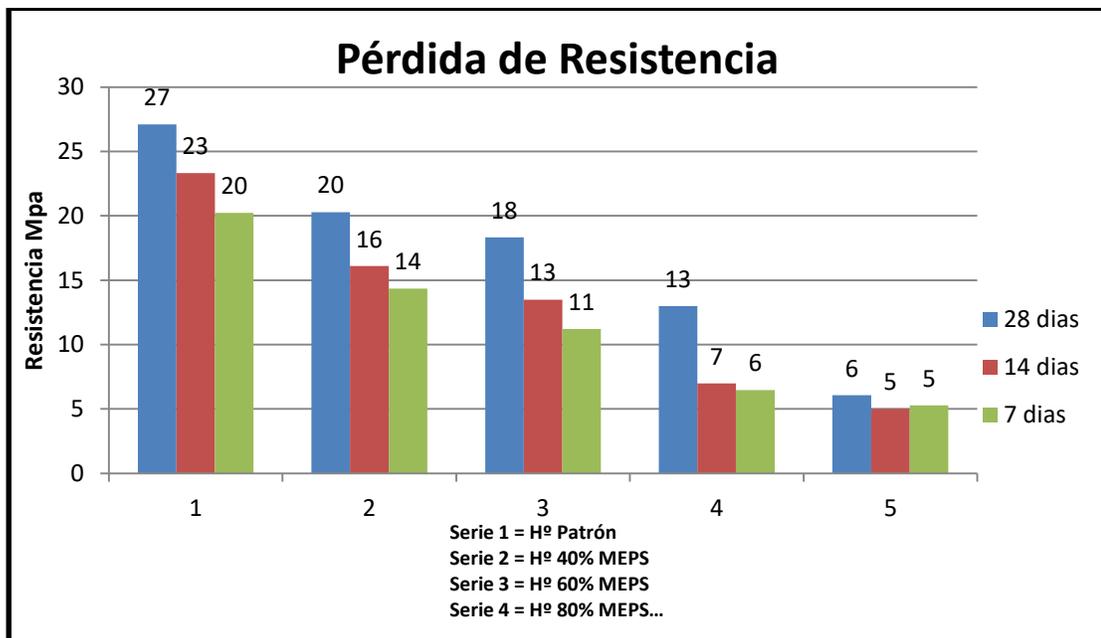


Figura 27) 4.2: Pérdida de la resistencia a compresión axial por series.  
(Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.4.- EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

La gráfica presenta la superposición de cómo evoluciona la resistencia a compresión axial para cada una de las dosificaciones.

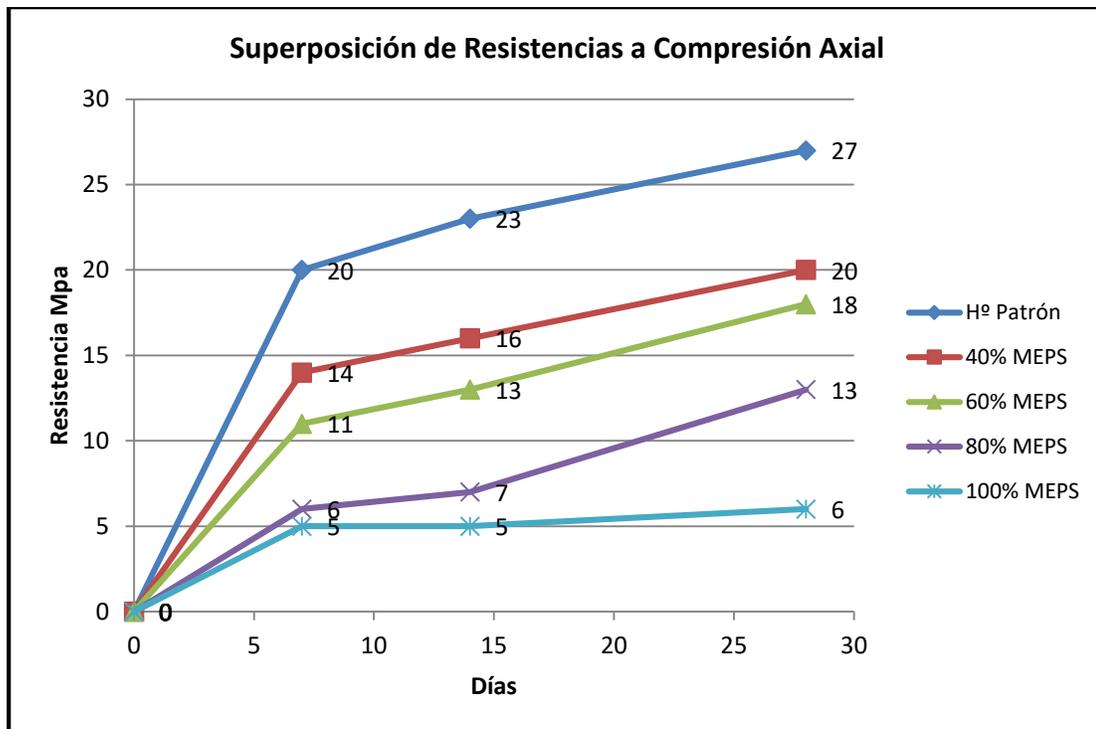


Figura 28) 4.3: Evolución de la resistencia a compresión axial vs tiempo.  
(Fuente: Elaboración Propia)

## 4.5.- RELACIONES.

### 4.5.1.- Resistencia vs Peso Específico.

La gráfica muestra la relación entre las resistencia a compresión axial con respecto a sus pesos específicos, para las diferentes dosificaciones con presencia de MEPS.

Además se realizó una regresión polinómica de segundo grado para ajustar los valores en una sola ecuación.

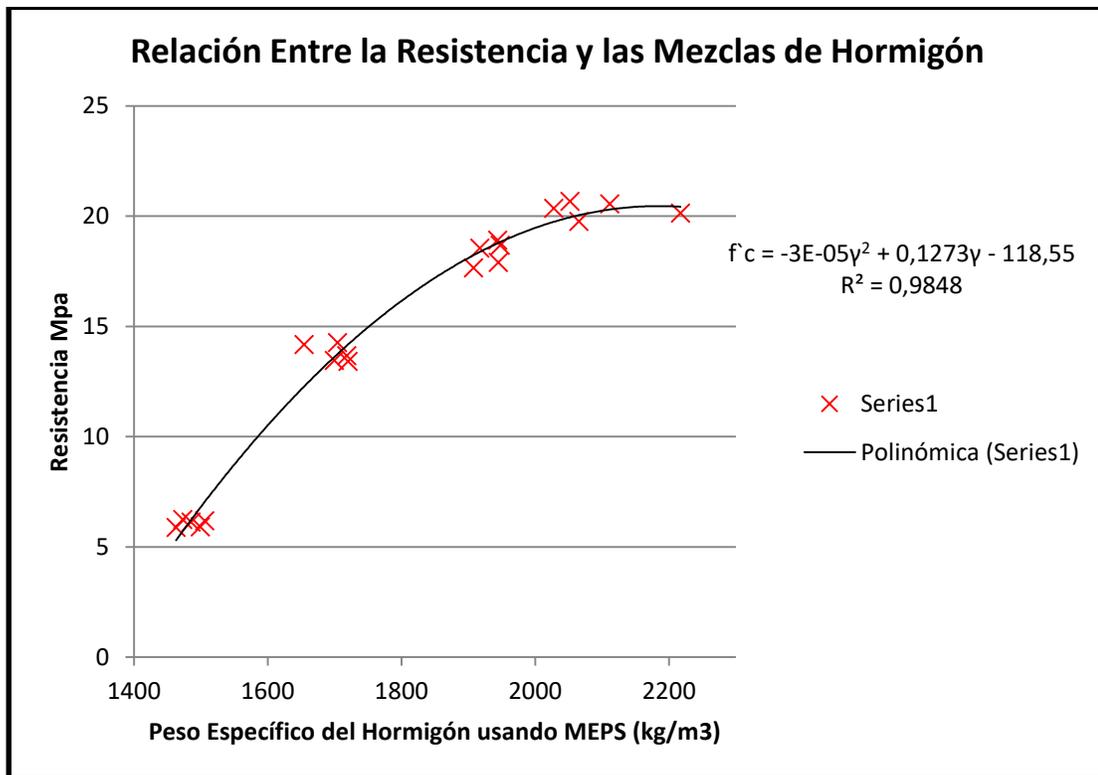


Figura 29) 4.4: Relación entre la resistencia a compresión axial vs peso específico.  
(Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.5.2.- Resistencia vs Porcentaje de MEPS.

La gráfica muestra la relación entre las resistencia a compresión axial con respecto al porcentaje de MEPS presentes en las dosificaciones.

Además se realizó una regresión polinómica de segundo grado para ajustar los valores en una sola ecuación.

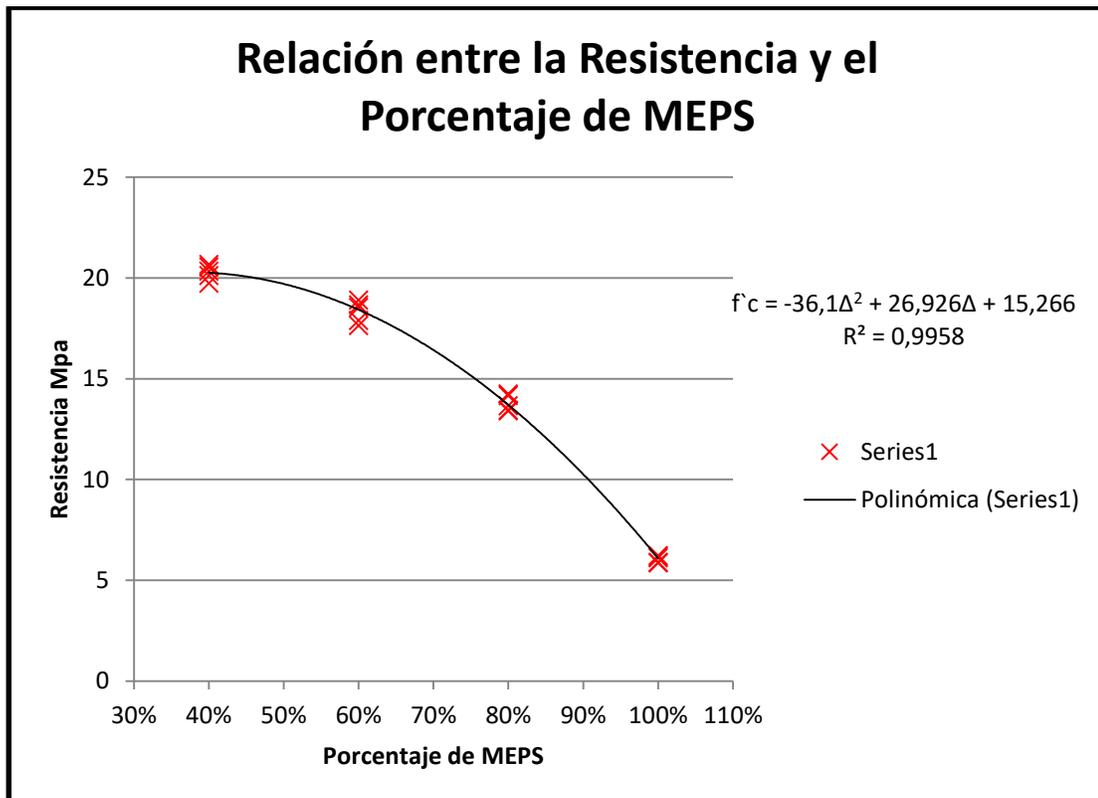


Figura 30) 4.5: Relación entre la resistencia a compresión vs porcentaje de MEPS.  
(Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.6.- ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS.

A modo de establecer la viabilidad de la utilización de “Hormigones livianos estructurales usando MEPS como agregado”, a continuación se presenta una justificación de precios unitarios, con el fin de tener una visión global en cuanto al monto de fabricación de cada hormigón.

Los valores utilizados en el presente estudio corresponden a valores netos en bolivianos, obtenidos de la revista de “Presupuestos y Construcción” del año 2014.

El costo de fabricación de MEPS lleva directa relación con la eficiencia y capacidad del horno existente en el laboratorio de suelos y hormigones de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la U.A.J.M.S.

Para el presente estudio se utilizó un Horno de la marca Controls, con las siguientes especificaciones técnicas:

*Tabla 16) 4.12: Especificaciones técnicas del horno eléctrico.*

Horno eléctrico Controls							
Capacidad	Max. Temperatura	Convección de aire	Energía	Dimensiones internas (mm)	Dimensiones externas (mm)	Número de rejillas	Peso aprox.
780 litros	200 °C	forzado	4200 W	815x814x1201	1213x1214x1461	3	200 kg

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 17) 4.13: Análisis de precios unitarios del hormigón patrón.

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES					
Proyecto :	Hormigón liviano usando MEPS como agregado				
Item Nº :	1				
Actividad :	Metro cubico de hormigón H-25				
Cantidad :	1,00				
Unidad :	m3				
Moneda :	Bs.				
1. MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL	
1	Cemento Portland	Kg	347,09	1,11	385,27
2	Arena comun	m3	0,41	120,75	49,51
3	Grava comun	m3	0,27	120,75	32,60
TOTAL MATERIALES					467,38
2. MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL	
1	Albañil	hr.	5,00	15,75	78,75
2	Ayudante	hr.	5,00	12,00	60,00
SUBTOTAL MANO DE OBRA					138,75
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)			56,79%	78,80	
IVA MANO DE OBRA = (%DE SUMA SUBTOTAL DE MANO DE OBRA+CARGAS SOCIALES)			14,94%	32,50	
TOTAL MANO DE OBRA					250,05
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL	
1					
HERRAMIENTAS = (5% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)			6,00%	15,00	
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					15,00
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
GASTOS GENERALES = 10% DE 1 + 2 + 3					73,24
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					73,24
5. UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
UTILIDAD = 5% DE 1 + 2 + 3 + 4					40,28
TOTAL UTILIDAD					40,28
6. IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
IMPUESTOS IT = 3% DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5					25,38
TOTAL IMPUESTOS					25,38
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					871,34
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)					872,00

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 18) 4.14: Análisis de precios unitarios de la mejor alternativa (Serie H°60).

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES					
Proyecto :	Hormigon liviano usando MEPS como agregado				
Item Nº :	1				
Actividad :	Metro cubico de hormigon H-25 con 60% MEPS granular y 5% MEPS fino				
Cantidad :	1,00				
Unidad :	m3				
Monedas :	Bs.				
1. MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL	
1	Cemento Portland	Kg	347,09	1,11	385,27
2	Arena comun	m3	0,26	120,75	30,97
3	Grava comun	m3	0,16	120,75	19,80
4	MEPS fino	m3	0,01	10,00	0,14
5	MEPS granular	m3	0,25	30,00	7,38
<b>TOTAL MATERIALES</b>					<b>443,56</b>
2. MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL	
1	Albañil	hr.	5,00	15,75	78,75
2	Ayudante	hr.	5,00	12,00	60,00
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>138,75</b>
<b>CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)</b>			56,79%	<b>78,80</b>	
<b>IVA MANO DE OBRA = (%DE SUMA SUBTOTAL DE MANO DE OBRA+CARGAS SOCIALES)</b>			14,94%	<b>32,50</b>	
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>250,05</b>
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL	
1					
<b>HERRAMIENTAS = (5% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)</b>			6,00%	<b>15,00</b>	
<b>TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>					<b>15,00</b>
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					<b>COSTO TOTAL</b>
<b>GASTOS GENERALES = 10% DE 1 + 2 + 3</b>					<b>70,86</b>
<b>TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS</b>					<b>70,86</b>
5. UTILIDAD					
					<b>COSTO TOTAL</b>
<b>UTILIDAD = 5% DE 1 + 2 + 3 + 4</b>					<b>38,97</b>
<b>TOTAL UTILIDAD</b>					<b>38,97</b>
6. IMPUESTOS					
					<b>COSTO TOTAL</b>
<b>IMPUESTOS IT = 3% DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5</b>					<b>24,55</b>
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>					<b>24,55</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)</b>					<b>843,00</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)</b>					<b>843,00</b>

(Fuente: Elaboración Propia)

## **CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

### **5.1.- COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN AXIAL.**

Viendo los resultados obtenidos en laboratorio, la adición del agregado de Poliestireno Expandido Modificado Granular y Fino tiene una incidencia directa en la resistencia del hormigón, donde en las series H°40, H°60, H°80 y H°100 experimentan una reducción de la resistencia a compresión de 25%, 32%, 52% y 78% respectivamente.

En las dosificaciones de las series H°60 y H°80, se puede ver que no alcanzan resistencias a temprana edad, debido a que la estructura plástica del MEPS no permite la absorción de agua; asimismo, ésto beneficia la hidratación en el periodo de fraguado, por lo que al pasar de los días el hormigón experimenta una resistencia de manera más acelerada, alcanzando a estar en un 32% por debajo del hormigón patrón a los 28 días para la serie H°60.

Por otra parte, la serie H°100 muestra claramente lo concluido anteriormente, que la resistencia del hormigón está fuertemente ligada al tipo de agregado presente en el mismo, donde podemos observar que sólo no tiene resistencia a temprana edad, sino que la evolución en el tiempo, éste sólo pudo aumentar un 16,67% de su resistencia a la compresión axial.

La dosificación de la serie H°60 (60% de reemplazo de agregado granular por MEPS y 5% de reemplazo de agregado fino por MEPS fino), se puede considerar y además afirmar la hipótesis planteada de que el mismo puede ser considerado como un Hormigón Liviano de clasificación Estructural, debido a que superó los 17 MPa, solicitados por la Norma Americana ACI 318-05 (Building Code Requirements for Structural Concrete).

Podemos apreciar también que la reducción en el peso muerto es del orden del 23% con respecto a un hormigón convencional, cerca de unos 550 Kg/m<sup>3</sup> menos, lo cual es bastante beneficioso si hablamos en tema de economía y obtención de estructuras más esbeltas.

Las dosificaciones de las series H°80 y H°100 no pueden ser usados como Hormigón Liviano Estructural, pero no quedan descartados para el uso de los mismos en el tema de fabricación de paneles aislantes debidos a las propiedades que brinda el MEPS.

## **5.2.- ANÁLISIS DE LA PROPIEDAD DE LA HOMOGENEIDAD DEL HORMIGÓN.**

Debido a la morfología porosa del MEPS, la docilidad del hormigón en su estado fresco no es buena debido a la fricción existente entre la pasta y el agregado a estudio en comparación a un hormigón convencional. Es por este motivo que se recomienda el uso de un aditivo superplastificante a manera de reducir la relación agua/cemento y de esta manera mejorar esta propiedad que es la más importante de un hormigón en estado fresco.

Por otra parte el bajo peso específico que posee el MEPS en comparación a la pasta y bajo la acción mecánica de compactación y vibrado, genera que el material tienda a flotar y depositarse en la superficie libre del encofrado donde se ha vertido el hormigón.

A continuación, se muestra la disposición del agregado en el hormigón tomando en cuenta las recomendaciones previamente hechas.



*Figura 31) 5.1: Homogeneidad del agregado en la serie H°40.*  
(Fuente: Elaboración Propia)



*Figura 32) 5.2: Homogeneidad del agregado en la serie H°60.*  
(Fuente: Elaboración Propia)



*Figura 33) 5.3: Homogeneidad del agregado en la serie H°80.  
(Fuente: Elaboración Propia)*



*Figura 34) 5.4: Homogeneidad del agregado en la serie H°100.  
(Fuente: Elaboración Propia)*

Como podemos observar la disposición del agregado en todas las muestras es homogénea en todo el volumen de la probeta, lo que es satisfactorio.

Para obtener la homogeneidad deseada, se tuvo mucho cuidado en el momento de compactar el hormigón y dándole la energía mínima requerida para que la pasta de hormigón rellene toda la probeta, para poder evitar la acumulación de burbujas de aire y evitar la formación de las llamadas cangrejas.

### **5.3.- ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS.**

Como se puede observar, la variación en el precio entre ambos hormigones es del orden del 3,3%, donde el hormigón liviano estructural con MEPS es el más barato.

No obstante, la solución más económica no siempre es la más propicia para una faena constructiva o un modelo estructural, debido a que hormigón que se ha obtenido en la presente, tiene menor densidad y menor resistencia.

En la parte constructiva, la mejor alternativa para su uso de este hormigón liviano estructural usando MEPS es de capa de compresión de losas, debido a que la resistencia necesaria para el diseño de la misma no es muy alta, así mismo, al ser este el elemento de peso muerto más representativa en una edificación viene a ser una buena opción, de esta manera se podría obtener vigas y columnas menos reforzadas y más esbeltas.

Pero es imperativo ver el tema desde la parte medioambiental, generar conciencia en la explotación de recursos no renovables, extracción indiscriminada de áridos de los lechos ríos en general y la contaminación que generamos al no realizar una buena gestión de desechos sólidos, en este caso el EPS que es un material altamente toxico y no degradable.

Y cualquier ayuda que le podamos dar a nuestro planeta y al mismo tiempo dejarles un planeta más verde a las próximas generaciones no tiene precio.

#### **5.4.- COMPATIBILIDAD DEL MEPS CON EL MORTERO DE HORMIGÓN.**

Al ser el MEPS un material plástico inerte, éste no altera la reacción química producida por el agua de amasado y los óxidos metálicos presentes en el clinker que compone el cemento, por lo que el fraguado inicial es el mismo que en un hormigón convencional.

En cuanto a la falta de adherencia debida a la porosidad del MEPS granular con el mortero de hormigón es mínimo y casi despreciable; ésto se observó al momento de realizar el análisis de homogeneidad, cuando al momento de realizar el corte a las probetas, se pudo observar que en todos los especímenes el agregado está recubierto en su totalidad por la pasta.

En cuanto al MEPS fino, el material equivale a una de las células que conforman el conglomerado de la espuma de EPS, que al poseer una característica celular cerrada y de muy baja porosidad, la adherencia del agregado con el mortero de hormigón es total, así mismo, el agregado de MEPS fino no altera las reacciones químicas presentes en el fraguado inicial.

Dentro del comportamiento en el hormigón fraguado, se pudo observar al momento de realizar la prueba de compresión que la falla se produjo en todo el cuerpo de la probeta, lo que nos indica que todos los materiales trabajaron en conjunto.

Lo mismo se puede hacer evidente en la siguiente figura de la serie H°60, misma que cumplió con la hipótesis planteada:



*Figura 35) 5.5: Ensayo de compresión axial de la serie H°60.*  
(Fuente: Elaboración Propia)

Después de todas estas observaciones, se puede garantizar que existe compatibilidad de los materiales presentes en el mortero con el agregado de MEPS.

#### **5.5.- GUÍA PARA LA DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES ESTRUCTURALES LIVIANOS USANDO MEPS.**

A manera de facilitar la dosificación de hormigones livianos estructurales, se adjunta un ejecutable.

La misma usa la base de datos para la dosificación del hormigón patrón que es de la autoría de Roger Laura Calle, auxiliar de docencia “Tecnología del Hormigón”, Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés.

### Características del ejecutable:

- Realiza la dosificación del hormigón patrón por los métodos CBH-87 y ACI-211.
- Muestra la resistencia proyectada a los 28 días dependiendo del porcentaje de reemplazo que se quiera realizar (desde 40% hasta el 80%).
- Muestra los pesos modificados de los agregados pétreos necesarios para la elaboración de un metro cúbico de hormigón.
- Muestra los volúmenes de reemplazo de MEPS granular y MEPS fino para elaborar un metro cubico de hormigón.

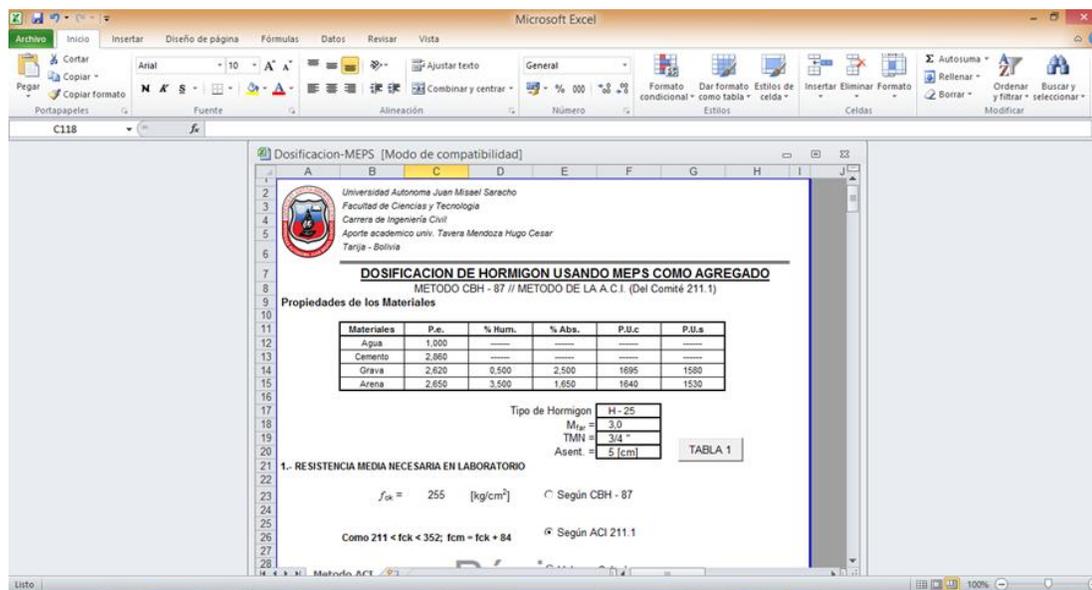


Figura 36) 5.6: Ejecutable para la dosificación de hormigones usando MEPS.  
 (Fuente: Elaboración Propia)

### Guía de uso del ejecutable:

- 1) Introducir las propiedades de la caracterización de la grava y arena a usar (peso específico, porcentaje de humedad, pesos unitario suelto, peso unitario compactado.).

- 2) Todas las dosificaciones parte de un hormigón H-25.
- 3) Introducir el valor del módulo de finura de la arena, tamaño máximo nominal del agregado grueso y preestablecer un asentamiento para el ensayo del Cono de Abrams (TABLA 1).
- 4) Seleccionar el método de cálculo para la dosificación (CBH-87 o ACI-211).
- 5) Seleccionar la cantidad de agua por metro cúbico de hormigón (TABLA 2) en función al tamaño máximo del agregado y el asentamiento previamente establecido.
- 6) Interpolar la relación agua/cemento (TABLA 3) que está en función a la resistencia media a compresión a los 28 días.
- 7) Interpolar el volumen de agregado grueso por metro cúbico de hormigón (TABLA 4) que está en función al tamaño máximo nominal del mismo y al módulo de finura de la arena.
- 8) Terminado todos los anteriores el ejecutable muestra resultados para la elaboración de un hormigón convencional, luego se selecciona el porcentaje de agregado grueso y fino que se quiere reemplazar por MEPS.
- 9) A continuación el ejecutable muestra el valor de la resistencia característica del hormigón a los 28 días, previo reemplazo de los agregados con MEPS.
- 10) Por último el ejecutable muestra una tabla resumen con los pesos por metro cúbico de hormigón corregidos y el volumen necesario de MEPS para reemplazar los agregados en los porcentajes previamente establecidos.

## **CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES.**

### **6.1.- TÉCNICAS.**

Con este estudio básico de las propiedades físico-mecánicas de hormigones que contienen MEPS como agregado, dejó las siguientes conclusiones en los parámetros observados de mayor relevancia:

#### **6.1.1.- Cohesión y Unión del Agregado a la Pasta.**

Todos los hormigones con MEPS sin el uso de agentes químicos para mejorar la cohesión o unión del agregado con la pasta mostraron una trabajabilidad y acabado relativamente buena, además pudo ser fácilmente compactado, pero siempre teniendo en cuenta la segregación del agregado, excepto por la serie H°100.

#### **6.1.2.- Segregación de los Agregados y Energía de Compactación.**

La experiencia de usar MEPS como agregado para el hormigón mostró que se debe tener cuidado al momento de realizar la dosificación, vaciado y compactado del hormigón en su estado fresco para minimizar la segregación de la mezcla de hormigón.

En orden, para obtener un hormigón más uniforme se debe limitar la cantidad de vibración hasta poder observar que el agregado de MEPS apenas se empieza a acumular en la superficie de las probetas o encofrados. Asimismo, para lograr una mejor compactación, se recomendaría el uso de un superplastificante a la mezcla y mejorar de esta manera su modesta trabajabilidad.

#### **6.1.3.- PROS y CONTRAS del AGREGADO GRANULAR y FINO de MEPS.**

La adición de MEPS como agregado reduce su trabajabilidad del hormigón en su estado fresco; esto puede ser causado por el tratamiento térmico aplicado a las partículas de EPS, debido a la superficie porosa celular que compone este material.

Mientras que el uso de MEPS como agregado mejora algunas propiedades del hormigón, también debilita negativamente otras. A manera que se aumenta la cantidad

de MEPS la resistencia a compresión axial decrece, debido a que la adherencia entre el MEPS y la pasta de cemento no puede ser conseguida en su totalidad, también por que las partículas en si son bastante débiles.

El estudio también mostró que el agregado fino de MEPS (0-2mm) incrementa la unión entre la pasta y el agregado grueso, mientras que la superficie porosa del agregado grueso de MEPS pudo debilitar significativamente la unión entre la pasta de cemento y los agregados.

#### **6.1.4.- Rango y Evolución de las Resistencias.**

El rango de la resistencia a compresión axial del concreto aumenta si se aumenta el porcentaje del agregado natural. Por lo que se encontró que la resistencia de los hormigones con MEPS es directamente proporcional con el peso específico del mismo.

La resistencia de los hormigones que usaron MEPS se incrementó a medida que el tamaño del agregado se redujo y cuando aumentó el tamaño del agregado grueso de origen natural, ésto se incrementó, se hizo más notable en mezclas más delgadas que en las mezclas más ricas.

La resistencia a compresión fue bastante baja para todas las mezclas de hormigón con MEPS durante el periodo inicial de curado, especialmente para las que contenían grandes volúmenes de MEPS, sin embargo, con el incremento del período de curado se pudo observar un incremento más acelerado, debido a que el MEPS no absorbe agua y beneficia el fraguado inicial.

#### **6.1.5.- Morfología del Agregado y Granulometría.**

En lo que se refiere a la forma del agregado del MEPS no influye directamente a la resistencia, ya sea este cúbico o amorfo, lo que sí se puede señalar como un punto importante es el tamaño del mismo, para el uso y obtención de resultados confiables se recomienda que el tamaño máximo del agregado no supere los 3/4 de pulgada, ya que a mayores tamaños desplazan más volumen de hormigón, donde en el caso de secciones esbeltas crean puntos de críticos de falla por corte.

La granulometría así como en el agregado de origen pétreo es importante para obtener mayor estabilidad volumétrica, resistencia y ocupen mayor masa en el hormigón, además que es compatible con la trabajabilidad. Por lo que obtener una buena gradación del mismo resulta imperativo.

#### **6.1.6.- Limitaciones.**

Debido a que el presente trabajo sólo se enfocó a analizar la resistencia característica a compresión del hormigón se aconseja que para tener un conocimiento más exacto del comportamiento del mismo complementar con estudios a tensión y torsión, y de esta manera poder garantizar el uso y puesta en obra teniendo la seguridad de que no existirán problemas estructurales cuando la edificación entre en funcionamiento.

#### **6.1.7.- Análisis Económico.**

Al ser la diferencia del 3,3% se podría llegar a justificar que la alternativa encontrada no es la solución ni de la parte económica como de la técnica, pero al ser imperativo pensar en el cuidado del medio ambiente en la actualidad, donde la contaminación terrestre, acuífera y el calentamiento global son problemas reales, esa diferencia toma un peso bastante importante por lo que sería un error de razonamiento emplear esta alternativa en un futuro no muy lejano.

### **6.2.- CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.**

Dentro de la contaminación ambiental, gestión de residuos sólidos y aplicación de la ley ambiental de medio ambiente los puntos más relevantes son los siguientes:

### **6.2.1.- ley de medio ambiente N° 1333 del 27 de abril de 1992.**

Art 1°.- La ley tiene como objetivo la protección y conservación del medio ambiente y los recursos naturales, regulando las acciones del hombre y promoviendo el desarrollo sostenible.

Al realizar el acopio del EPS, se pudo evidenciar que no sólo no hay conciencia por el medio ambiente por parte de las empresas constructoras, sino que también no existe control por parte de las autoridades competentes.

En la ciudad de Tarija no se cumple con ley en los siguientes:

#### **Título VIII - De la Ciencia y Tecnología.**

Falta de aplicación de nuevas tecnologías fomentando la reutilización de los escombros generados en obra.

#### **Título X - Participación ciudadana.**

No existe participación de la ciudadanía, mismos que al ver un acto de contaminación directa de nuestros recursos vitales no realizan la denuncia pertinente.

#### **Título XI - Medidas de seguridad, infracciones administrativas y delitos ambientales.**

No existe control en cuanto a la gestión de residuos sólidos generados en obras civiles en el departamento.

No existe administración para hacer cumplir la ley N°1333.

### **6.2.2.- Reciclado, Reutilización y Gestión de Residuos de EPS.**

El uso de hormigones con MEPS es importante desde la perspectiva ambiental. Si los escombros de EPS serían reducidos a agregados para hormigones livianos, se esperarían efectos positivos en el ámbito del reciclado de los recursos y la protección ambiental, dado a que los agregados de MEPS se ofrecen como un material de construcción

potencialmente sustentable, simultáneamente ayuda a resolver el problema ambiental de reducción de los residuos sólidos. Ésto tendría una doble ventaja en la reducción de costos en los materiales de construcción y también en el costo de la eliminación de residuos.

El agregado de MEPS, si es utilizado en la industria de la construcción tiene un tiempo de vida efectivo muy largo, debido a su durabilidad, por lo que se reduciría al mínimo la eliminación del producto.

Los residuos de EPS causa contaminación al medio ambiente y el costo de almacenamiento de la misma es muy alta. La reutilización, el reciclado y la reducción de los desechos se consideran como los únicos métodos de recuperación de este material, sin embargo las ejecuciones del mismo en la construcción tiene muchas oportunidades para mejorar.

### **6.3.- APLICACIONES EN OBRA.**

A manera de identificar los posibles ámbitos de aplicación en obras civiles, se realizaron las siguientes recomendaciones prácticas:

#### **6.3.1.- Placa de Compresión en Losas Alivianadas.**

Como solución para disminuir el peso propio de estructuras de gran envergadura se aconseja la utilización del hormigón estructural alivianado con MEPS en la elaboración de la placa de compresión en losas alivianadas, dado a que este elemento horizontal es el mayor generador de carga muerta.

#### **6.3.2.- Losa de Cubierta.**

Losas de cubiertas que no trabajan como azoteas y que al contener MEPS trabajan de buena manera como aislante térmico para estaciones tanto cálidas como gélidas.

### **6.3.3.- Viviendas.**

Para la elaboración de edificaciones que no necesitan gran resistencia característica a la compresión del hormigón en sus elementos principales (vigas, columnas y fundaciones), esta puede ser empleada en viviendas, como las del plan “vivienda social” del gobierno.

### **6.3.4.- Muros aislantes.**

Se puede sugerir el uso del hormigón de la serie H°100 en muros apoyados en losas de placa plana, debido a que estos muros no son portantes y que además ayudaría al ahorro de energía por sus grandes aptitudes de aislamiento térmico y acústico.

## **6.4.- GENERALES.**

Una vez realizado el estudio, recopilación de información primaria en laboratorio y análisis de resultados, podemos dar la siguiente conclusión:

Se puede concluir que se cumplió con el objetivo del presente estudio el cual fue obtener un Hormigón Liviano Estructural usando Poliestireno Expandido Modificado por Tratamiento Térmico como agregado en un 60% de reemplazo del agregado granular y en un 5% de reemplazo del agregado fino, al alcanzar una resistencia característica a la compresión axial de 18 MPa y un peso específico promedio de 1910 kg/m<sup>3</sup> y reduciendo cerca de un 32% el peso propio en comparación a un hormigón convencional, aún más importante dándole un uso al escombros de poliestireno expandido y de esta forma edificar construcciones más verdes y minimizar la contaminación medioambiental.