





**ESCUELA DE  
INGENIERÍA CIVIL**

Universidad Latina de Costa Rica

Universidad Latina de Costa Rica  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Escuela de Ingeniería Civil

Trabajo final de graduación para optar al grado académico de  
licenciatura en Ingeniería Civil, modalidad tesis.

**Evaluación del poliestireno expandido (EPS) como agregado en  
mezclas secas de concreto liviano para mampostería**

Autor: Juan José Álvarez Guzmán

Tutor: Ing. Minor Murillo Chacón

Lector: Ing. Andrés Reyes Bonilla M.Sc

**Heredia, 14 de septiembre del 2017**

**COMITÉ ASESOR**

**ING. MINOR EDUARDO MURILLO CHACÓN**  
**TUTOR**

**ING. ANDRÉS REYES BONILLA**  
**LECTOR**

**ING. DOMINGO ERNESTO DELGADO MARTINEZ**  
**REPRESENTANTE DE RECTORÍA**

## TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: "EVALUACIÓN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COMO AGREGADO EN MEZCLAS SECAS DE CONCRETO LIVIANO PARA MAMPOSTERÍA.", fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:



**ING. MINOR EDUARDO MURILLO CHACÓN**

**TUTOR**



**ING. ANDRÉS REYES BONILLA**

**LECTOR**



**ING. DOMINGO ERNESTO DELGADO MARTINEZ**

**REPRESENTANTE DE RECTORÍA**

## **Agradecimientos**

Primeramente, agradezco a Dios por permitirme culminar tan importante etapa en mi vida, por darme la fortaleza para seguir adelante y no rendirme cuando las circunstancias se tornaron difíciles, por iluminarme y darme la sabiduría para enfrentar cada uno de los retos que se me presentaron a lo largo de mi formación.

A mis padres, María Eugenia Guzmán Aguilar y Juan José Álvarez Chaves. Ellos son las personas más importantes en mi vida, quienes me brindaron su apoyo incondicional para seguir adelante luchando por lograr mi objetivo. Gracias por sus consejos, por su ayuda, por su aliento, por su motivación y sobre todo por su amor.

A mis hermanos, que también me ayudaron y apoyaron en todo momento. Especialmente a Marco Álvarez Guzmán, quien me ayudó mucho económicamente a lo largo de toda mi vida universitaria.

A mi novia, Grettel Estrada Acevedo, quien formó parte importante de mi vida durante el tiempo universitario, gracias por su apoyo, comprensión y por haber sido la causante principal para que retomara mis estudios.

A mis tíos Rodrigo Mora Alfaro y Haydée Guzmán Aguilar, quienes no tuvieron duda en poner su casa a mi disposición para que viviera durante los años que duró mi carrera universitaria.

A la empresa Productos de Concreto, S. A., por darme la oportunidad de realizar mi proyecto de graduación en sus instalaciones y poner a disposición tanto los materiales como todo el equipo necesario para el desarrollo de la investigación.

A los profesores miembros del tribunal examinador, el Ing. Andrés Reyes Bonilla M.Sc e Ing. Minor Murillo Chacón, quienes me asesoraron, y me dieron su apoyo y colaboración al 100% en el seguimiento y desarrollo del presente proyecto de investigación.

A los técnicos de laboratorio William Montero Villalobos y Eduardo Artavia Calderón, quienes con su experiencia me orientaron, me dieron valiosos consejos y me enseñaron cada uno de los procesos realizados en la investigación desarrollada.

## **Dedicatoria**

El presente trabajo de investigación se lo dedico primordialmente a Dios quien fue el que me guio y me dio la sabiduría y fortaleza para seguir adelante a pesar de las dificultades que se presentaron en el camino.

A mis padres, quienes son lo más importante en vida, este triunfo se lo dedico a ellos, ya que gracias a su ayuda, esfuerzo y apoyo incondicional logre alcanzar la meta.

A mi familia en general, por el apoyo y aliento que me brindaron para seguir adelante hasta el final de mi carrera.

## Resumen

Actualmente, la mampostería estructural es la más utilizada en la construcción en Costa Rica. Se utiliza en sistemas reforzados mediante bloques huecos y tienen una densidad de aproximadamente  $2100 \text{ kg/m}^3$ . El desarrollo de una mezcla de concreto con baja densidad para mampostería mejora significativamente la manipulación, el transporte y procesos constructivos.

Para la elaboración de la mezcla se toma como referencia el diseño utilizado en la industria, la cual cuenta con un equipo de fabricación de la marca Masa. Para realizar la mezcla seca de concreto liviano se utiliza como agente externo poliestireno expandido (EPS), el cual se agrega en un rango de 40% del volumen total, lo que permite evaluar densidades de aproximadamente  $1800 \text{ kg/m}^3$ . Para evaluar la influencia del (EPS) en la resistencia a la compresión del elemento se utilizó la metodología propuesta por Frasson Jr en el año 2000, la cual permite también la evaluación de la cohesión y textura superficial del elemento.

El diseño de mezcla desarrollado se evalúa con los estándares de calidad vigentes en Costa Rica para la elaboración de mampostería estructural, la cual es supervisada por la norma ASTM, que a su vez es adaptada en el país por El Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO), las cuales establecen una resistencia mínima a la compresión entre 13.0 MPa para bloques tipo A.

La incorporación de (EPS) en la mezcla no resultó satisfactoria, ya que no existe una reacción química entre las partículas, lo cual desfavorece considerablemente la resistencia a la compresión del elemento, por lo tanto, no es recomendable utilizar (EPS) en mezclas secas de concreto.

## **Abstract**

Currently in Costa Rica structural masonry is the most used in construction, which is used in systems reinforced by hollow blocks and have a density of approximately  $2100 \text{ kg} / \text{m}^3$ . The development of a low density masonry concrete mix significantly improves handling, transportation and construction processes.

For the production of the mixture, the design currently used in the industry, which has a manufacturing equipment of the Masa brand, is taken as a reference. To perform the dry concrete mix, EPS expanded polystyrene is used as an external agent, which is added in a range of 40% of the total volume, which allows the evaluation of densities of approximately  $1800 \text{ kg} / \text{m}^3$ . In order to evaluate the influence of (EPS) on the resistance to compression of the element, the methodology proposed by Frasson Jr in 2000 was used, which also allows the evaluation of the cohesion and surface texture of the element.

The developed blend design is evaluated with the quality standards in force in Costa Rica for the elaboration of structural masonry, which is supervised by the ASTM standard, which in turn are adapted in the country by the Costa Rican Technical Standards Institute (INTECO), which establish a minimum compressive strength between 13.0 MPa for blocks type A.

The incorporation of (EPS) in the mixture was not satisfactory, since there is no chemical reaction between the particles which considerably disadvantages the compressive strength of the element, therefore it is not advisable to use (EPS) in dry mixtures of concrete.



## Tabla de contenido

CAPÍTULO 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes del problema .....	1
1.2 Planteamiento del problema de investigación .....	2
1.3 Hipótesis.....	3
1.4 Justificación del estudio de investigación .....	3
1.5 Objetivo general .....	4
1.6 Objetivos específicos.....	4
1.7 Alcances y limitaciones.....	4
1.7.1 Alcances del proyecto .....	4
1.7.2 Limitaciones del proyecto .....	5
1.8 Impacto.....	5
CAPÍTULO 2. Marco teórico.....	6
2.1 Marco teórico-conceptual.....	6
2.2 Caracterización del concreto .....	6
2.2.1 Resistencia a la compresión del concreto .....	7
2.2.2 Resistencia a la tracción o tensión del concreto .....	7
2.2.3 Resistencia a la flexión del concreto .....	8
2.2.4 Curado del concreto.....	8
2.3 Concreto seco .....	9
2.4 Mezclas livianas .....	11
2.5 Poliestireno expandido (EPS).....	14
2.5.1 Definición de EPS .....	14
2.5.2 Aplicaciones del EPS .....	14
2.5.3 Características físicas y mecánicas del EPS .....	14
2.6 Materiales que constituyen las mezclas de concreto .....	15
2.6.1 Cemento hidráulico .....	15
2.6.2 Agregados.....	17
2.7 Agua .....	19
2.8 Relación agua-cemento .....	20
2.9 Vibro-compactación en el concreto.....	23
2.10 Bloques de concreto .....	24

2.10.1 Clasificación y requisitos de las unidades de mampostería huecas de concreto según la norma INTE C90 .....	24
2.10.2 Clasificación y requisitos de las unidades de mampostería huecas de concreto según el Código Sísmico de Costa Rica 2010 .....	26
2.11 Muestreo y métodos de ensayo de unidades de mampostería de concreto según norma INTE C5026	
2.11.1 Cálculos para unidades de mampostería según norma INTE C 50 .....	27
2.11.2 Contenido de humedad .....	27
2.11.3 Densidad del espécimen .....	28
2.11.4 Cálculo del área neta promedio .....	28
2.11.5 Cálculo del área bruta .....	29
2.11.6 Resistencia a la compresión sobre el área neta .....	29
2.11.7 Resistencia a la compresión sobre el área bruta .....	30
2.12 Método de diseño de mezclas de concreto para mampostería estructural propuesto por Frasson Jr	30
2.12.1 Método de Frasson Jr .....	30
2.12.2 Evaluación de cohesión y la textura superficial .....	32
2.12.3 Preparación de la mezcla para diseñar la curva de diseño de la mezcla .....	35
2.12.4 Evaluación de la fuerza a la compresión media como función de la fuerza a la compresión especificada .....	36
2.12.5 Determinación de la relación cemento-agregado .....	37
2.13 Marco situacional .....	38
2.14 Productos de Concreto .....	38
2.14.1 Visión .....	38
2.14.2 Ubicación .....	38
<b>CAPÍTULO 3. Marco metodológico .....</b>	<b>40</b>
3.1 Enfoque metodológico y métodos de la investigación propuesta .....	40
3.2 Categorías de análisis de la investigación .....	41
3.2.1 Alcance de tipo exploratorio .....	41
3.2.2 Alcance de la investigación .....	41
3.3 Sujetos y métodos de información .....	42
3.3.1 Recopilación de información .....	42
3.4 Definición de variables .....	43
3.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos .....	44
3.5.1 Investigación de documentos .....	44
3.5.2 Pruebas de laboratorio .....	45
3.5.3 Fotografías .....	48

3.5.4 Recolección y procesamiento de datos .....	48
3.6 Presupuesto.....	48
3.7 Procedimiento para la ejecución experimental de la investigación .....	49
3.8 Procedimiento de pruebas experimentales para los bloques .....	50
3.8.1 Muestreo y método de ensayo en mampostería.....	50
CAPÍTULO 4. Resultados y análisis de los resultados .....	59
4.1 Tabulación de datos de muestreo y ensayos de unidades de mampostería según norma INTE C50	59
4.1.1 Medición de las dimensiones según la norma INTE C50 .....	59
4.1.2 Tabulación de datos y cálculos según la norma INTE C50.....	61
4.1.3 Tabulación de datos y cálculos de la resistencia a la compresión sobre el área neta a diferentes edades .....	63
4.1.4 Ensayo de bloque a la compresión para estimación de $F_{bk}$ y obtención de $f_s$ deseado. ....	67
4.2 Determinación de la masa para especímenes de 5 cm x 10 cm en función del volumen neto y masa húmeda del bloque en estudio .....	70
4.3 Método de Frasson Jr para diseño de PC hecho en planta vrs laboratorio .....	71
4.3.1 Caracterización granulométrica de los agregados según norma INTE C46.....	75
4.3.2 Ensayos de los cilindros 5 cm x 10 cm con el diseño de mezcla actual utilizada para la fabricación de bloques.....	79
4.3.3 Calibración mediante el método de Frasson Jr.....	85
4.4 Diseño de mezcla de concreto liviano con EPS .....	86
4.4.1 Determinación de la densidad real y aparente del poliestireno expandido.....	87
.....	90
4.4.2 Determinación de la cantidad de EPS adicionada a la mezcla de concreto para obtener una densidad de 1800 kg/m <sup>3</sup> .....	92
4.4.3 Cálculo de la resistencia a la compresión promedio a 24 horas de los especímenes de 5 cm x 10 cm con adición de poliestireno expandido .....	94
4.4.4 Determinación de la cantidad de masa para especímenes de 5 cm x 10 cm con EPS para una densidad de 1800 kg/m <sup>3</sup> .....	96
4.5 Método de Frasson Jr para determinar el mejor diseño de mezcla liviana con EPS .....	97
4.5.1 Ensayos de los especímenes de 5 cm x 10 cm utilizando cemento MP y poliestireno expandido .....	98
4.5.2 Ensayos de los especímenes de 5 cm x 10 cm utilizando cemento UG-AR y poliestireno expandido .....	101
4.5.3 Comparación de los resultados obtenidos de la sección 4.5.1 y 4.5.2.....	106
4.5.4 Ensayos de los especímenes de 5 cm x 10 cm utilizando cemento MP y poliestireno expandido Politerm + aditivo acelerante de resistencia .....	108

4.5.5 Selección del diseño con EPS que arrojo los mejores resultados de resistencia a la compresión .....	113
4.5.6 Diseño seleccionado de mezcla liviana con adición de EPS .....	115
4.6 Análisis de los resultados .....	121
4.6.1 Resistencia a la compresión de los bloques ensayados .....	121
4.6.2 Calibración del equipo mediante la metodología propuesta por Frasson Jr .....	125
4.6.3 Mezclas de concreto liviano .....	131
4.6.4 Mezcla de concreto liviano sustituyendo EPS (BASF) por Politerm .....	135
4.6.5 Mezcla de concreto liviano con Politerm mas aditivo acelerante de la resistencia .....	137
4.6.6 Set completo de ensayos al diseño seleccionado de mezcla liviana con adición de EPS .....	139
CAPÍTULO 5. Conclusiones y recomendaciones .....	146
5.1 Conclusiones .....	146
5.2 Recomendaciones .....	147
CAPÍTULO 6. Referencia bibliográfica.....	149
Referencia bibliográfica .....	149
CAPÍTULO 7. Anexos .....	151

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Partículas adecuadamente rellenas entre las perlas de EPS .....	12
Ilustración 2 Partículas de EPS sin relleno entre si .....	13
Ilustración 3 Mal recubrimiento entre las partículas .....	13
Ilustración 4 Set completo del equipo utilizado para la elevación de los cilindros de 5 cm x 10 cm .....	31
Ilustración 5 Secuencia de la realización de los especímenes de 5 cm x 10 cm .....	32
Ilustración 6 Indicación de contenido óptimo de humedad para la mezcla .....	33
Ilustración 7 Determinación de la cohesión de la mezcla fresca.....	35
Ilustración 8 Ubicación de plantas de productos de concreto .....	39
Ilustración 9 Alcances que puede tener un estudio cuantitativo .....	41
Ilustración 10 Bandejas según especificaciones INTE C71 .....	45
Ilustración 11 Balanza de precisión de 0.1% de la masa de ensayo.....	46
Ilustración 12 Balanza para determinar densidades de solidos .....	46
Ilustración 13 Horno ventilado capaz de mantener una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	46
Ilustración 14 Prensa hidráulica automática de ensayo a compresión .....	47
Ilustración 15 Batidora estacionaria .....	47
Ilustración 16 Equipo propuesto por Frasson Jr.....	47
Ilustración 17 Muestreo de elementos de mampostería .....	51
Ilustración 18 Transporte de los elementos de mampostería .....	52
Ilustración 19 Método de curado propuesto .....	52
Ilustración 20 Coronación del bloque .....	53
Ilustración 21 Prensa hidráulica para ensayar bloques a compresión .....	53
Ilustración 22 Dimensiones de la longitud del bloque .....	54
Ilustración 23 Dimensiones de la altura del bloque .....	54
Ilustración 24 Dimensiones del ancho del bloque.....	55
Ilustración 25 Dimensiones del espesor de las paredes externas del bloque .....	55
Ilustración 26 Dimensiones del espesor de las paredes internas del bloque .....	55
Ilustración 27 Saturación de bloques .....	56
Ilustración 28 Peso saturado del bloque .....	57
Ilustración 29 Secado del bloque para tomar el peso saturado superficie seca.....	57
Ilustración 30 Peso saturado superficie seca .....	57
Ilustración 31 Secado al horno de los bloques .....	58
Ilustración 32 Medición de dimensiones según INTE C50.....	61
Ilustración 33 Prensa hidráulica para ensayo a esfuerzos de compresión en bloque .....	65
Ilustración 34 Ensayo a la compresión del bloque a 7 días.....	65
Ilustración 35 Especímen con masa máxima, compactación óptima .....	72
Ilustración 36 Curado de cilindros en caja de poliestireno con lámina de agua .....	72
Ilustración 37 Prueba de cohesión en los cilindros .....	73

Ilustración 38 Fisura del espécimen a los 5 kg.....	74
Ilustración 39 Falla total de los cilindros .....	74
Ilustración 40 Distribución granulométrica de los agregados .....	79
Ilustración 41 Ensayo de resistencia a la compresión en espécimen de 5 cm x 10 cm.....	80
Ilustración 42 Ensayo a compresión del espécimen de 5 cm x 10 cm mediante presa hidráulica .	80
Ilustración 43 Ensayo a compresión del espécimen de 5 cm x 10 cm .....	81
Ilustración 44 Ensayo a 28 días cilindro de masa máxima hecho con mezcla tomada directamente de la planta .....	81
Ilustración 45 Ensayo a 28 días cilindro de masa media hecho con mezcla tomada directamente de la planta .....	81
Ilustración 46 Ensayo a 28 días cilindro de masa mínima hecho con mezcla tomada directamente de la planta .....	82
Ilustración 47 Evaluación de textura superficial, cilindro masa máxima vrs bloque de 12 cm x 20 cm x 40 cm.....	82
Ilustración 48 Evaluación de textura superficial, cilindro masa media vrs bloque de 12 cm x 20 cm x 40 cm.....	82
Ilustración 49 Evaluación de textura superficial, cilindro masa mínima vrs bloque de 12 cm x 20 cm x 40 cm.....	83
Ilustración 50 Peso de las esferas de EPS en balanza analítica.....	89
Ilustración 51 Medición del diámetro de las esfera de EPS .....	89
Ilustración 52 Toma de muestra de EPS para densidad aparente.....	91
Ilustración 53 Muestra de EPS para cálculo de densidad aparente .....	91
Ilustración 54 Toma de lectura del peso de la muestra de EPS para cálculo de densidad aparente .....	92
Ilustración 55 Cilindro de 5 cm x 10 cm con EPS .....	98
Ilustración 56 Ensayo de resistencia a la compresión mediante prensa hidráulica .....	99
Ilustración 57 Ensayo a compresión del espécimen de 5 cm x 10 cm con EPS.....	99
Ilustración 58 Ensayo a 24 horas en cilindro de masa mínima .....	100
Ilustración 59 Textura superficial del cilindro con EPS vrs bloque.....	100
Ilustración 60 Textura superficial en cilindro vrs bloque .....	100
Ilustración 61 Ensayo a compresión de cilindro con EPS y cemento UG-AR .....	103
Ilustración 62 Ensayo a la compresión de cilindros con 30% más de cemento UG-AR .....	103
Ilustración 63 Ensayo a compresión de cilindros.....	104
Ilustración 64 Ensayo a compresión de cilindro con cemento UG-AR .....	104
Ilustración 65 Textura superficial de cilindro con cemento UG-AR vrs bloque .....	104
Ilustración 66 Cilindros con Politerm .....	109
Ilustración 67 Cilindro con Politerm.....	109
Ilustración 68 Cilindro con Politerm + aditivo acelerante de resistencia.....	109
Ilustración 69 Ensayo de resistencia a la compresión mediante prensa hidráulica .....	110
Ilustración 70 Ensayo de resistencia a la compresión en cilindro con Politerm .....	110
Ilustración 71 Ensayo de resistencia a la compresión de cilindro con Politerm .....	110

Ilustración 72 Ensayo de resistencia a la compresión en cilindro con Politerm + aditivo acelerante .....	111
Ilustración 73 Textura superficial en cilindro con Politerm vrs bloque .....	111
Ilustración 74 Textura superficial en cilindro con Politerm vrs bloque .....	111
Ilustración 75 Ensayo a la compresión del espécimen en prensa hidráulica .....	115
Ilustración 76 Ensayo a la compresión en cilindros con EPS a 24 horas .....	116
Ilustración 77 Ensayo a la compresión en cilindro con EPS a los 7 días .....	116
Ilustración 78 Ensayo a la compresión en cilindro con EPS a los 28 días .....	116
Ilustración 79 Ensayo de cohesión a cilindros con EPS .....	117
Ilustración 80 Ensayo de cohesión a cilindros con EPS .....	117
Ilustración 81 Ensayo de cohesión a cilindros con EPS .....	117
Ilustración 82 Falla por ensayo de cohesión a cilindros con EPS .....	118
Ilustración 83 Falla por ensayo de cohesión a cilindros con EPS .....	118
Ilustración 84 Textura superficial masa mínima .....	118
Ilustración 85 Textura superficial masa media .....	119
Ilustración 86 Textura superficial masa máxima .....	119

## Índice de tablas

Tabla 1 Tipos de cemento hidráulico .....	16
Tabla 2 Límites granulométricos del agregado fino.....	18
Tabla 3 Requisito granulométrico para agregado grueso.....	19
Tabla 4 Resistencia mínima a la compresión sobre el área neta a los 28 días .....	25
Tabla 5 Absorción según tipo de bloque.....	25
Tabla 6 Espesores mínimos de pared .....	25
Tabla 7 Tabla de coeficientes de variación para los valores de resistencia a la compresión .....	36
Tabla 8 Definición de variables .....	43
Tabla 9 Cantidad de materiales utilizados en el desarrollo del proyecto .....	49
Tabla 10 Dimensiones de los bloques muestreados según INTE C50.....	60
Tabla 11 Diferencia de peso dimensiones en los bloques de concreto .....	60
Tabla 12 Características y cálculos de los bloques de concreto según INTE C50.....	61
Tabla 13 Resistencia a la compresión a diferentes edades.....	66
Tabla 14 Resistencias a la compresión de los bloques de concreto según norma para la estimación de $F_{bk}$ .....	68
Tabla 15 Datos para la estimación de resistencia a la compresión promedio en función de una resistencia a la compresión dada.....	69
Tabla 16 Cálculos para la determinación de $f_s$ .....	69
Tabla 17 Análisis granulométrico arena industrial Guápiles .....	76
Tabla 18 Contenido de humedad de arena industrial Guápiles.....	76
Tabla 19 Análisis granulométrico arena industrial Cerro Minas .....	77
Tabla 20 Contenido de humedad arena industrial Cerro Minas.....	77
Tabla 21 Análisis granulométrico piedra quinta Cerro Minas .....	78
Tabla 22 Contenido de humedad piedra quinta Cerro Minas.....	78
Tabla 23 Datos de los ensayos realizados a los cilindros con el diseño de mezcla actual.....	80
Tabla 24 Resistencia a la compresión de los cilindros convertidos a resistencia a la compresión de bloques .....	85
Tabla 25 Muestras de poliestireno expandido para el cálculo de la densidad real.....	88
Tabla 26 Muestra de poliestireno expandido para cálculo de densidad aparente .....	90
Tabla 27 Datos para la estimación de resistencia a la compresión promedio de una resistencia a la compresión dada .....	95
Tabla 28 Cálculos para determinación de $f_s$ requerido.....	95
Tabla 29 Resumen de los datos obtenidos en los cilindros realizados con cemento MP.....	98
Tabla 30 Resumen de los datos obtenidos en los cilindros con cemento UG-AR.....	102
Tabla 31 Resumen de los datos obtenidos en los cilindros de realizados con cemento UG-AR, corrección por humedad.....	102
Tabla 32 Esfuerzos obtenidos con diferentes tipos de cementos .....	107
Tabla 33 Resumen de los datos obtenidos en los cilindros con cemento MP y Politerm .....	108



Tabla 34 Resumen de los datos obtenidos en los cilindros con cemento MP y Politerm + aditivo .....	108
Tabla 35 Resistencia a la compresión $F_{bm}$ a 24 horas de los especímenes con EPS .....	114
Tabla 36 Diseño con mejor resultado de resistencia a la compresión de mezcla con EPS .....	115
Tabla 37 Resumen de la resistencia a la compresión de los bloques ensayados.....	122
Tabla 38 Resistencia a la compresión de $F_{bm}$ de los cilindros de 5 cm x 10 cm.....	126
Tabla 39 Resistencia a la compresión $F_{bm}$ de los cilindros de 5 cm x 10 cm (Mezclas, TFG, PC Lab) .....	127
Tabla 40 Resistencia a la compresión $F_{bm}$ de los cilindros de 5 cm x 10 cm (Mezclas, TFG, PC Lab, PC masa) .....	129
Tabla 41 Resumen de los datos con 10% y 30% más de cemento.....	131
Tabla 42 Resumen con los datos de 3 % más de cemento MP y UG-AR.....	133
Tabla 43 Resumen con datos EPS de BASF y Politerm .....	135
Tabla 44 Resumen con datos EPS de BASF y Politerm + aditivo.....	138
Tabla 45 Resumen de datos del mejor diseño de mezcla seca liviana .....	140

## Índice de gráficos

Gráfico 1 Efecto del tiempo de curado húmedo sobre el desarrollo de la resistencia del concreto	9
Gráfico 2 Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua-material cementante para el concreto con agregado grueso de tamaño máximo nominal de 19 mm a 25 mm (3/4 a 1 pulg.)	20
Gráfico 3 Efecto típico de la edad y de relación a/c en la resistencia del hormigón (cemento portland, grava rodada)	22
Gráfico 4 Resistencia del concreto contra la relación a/c, para diferentes grados de compactación	23
Gráfico 5 Resistencia a compresión ( $f'_c$ ) vrs tiempo (días)	66
Gráfico 6 Distribución granulométrica arena industrial Guápiles	76
Gráfico 7 Distribución granulométrica arena industrial Cerro Minas	77
Gráfico 8 Distribución granulométrica piedra quinta Cerro Minas	78
Gráfico 9 Resistencia a la compresión a 24 horas vrs densidad seca	83
Gráfico 10 Resistencia a la compresión a 7 días vrs densidad seca	84
Gráfico 11 Resistencia a la compresión $f'_c$ vrs densidad seca	84
Gráfico 12 Curva de calibración en función de la resistencia a la compresión de las cilindros de 5 cm x 10 cm	86
Gráfico 13 Resistencia a la compresión de los cilindros con EPS a 24 horas vrs densidad húmeda	101
Gráfico 14 Resistencia a la compresión de los cilindros con EPS a 24 horas vrs densidad húmeda (Cemento UG-AR)	105
Gráfico 15 Resistencia a la compresión de los cilindros con EPS a 24 horas vrs densidad húmeda (Cemento UG-AR, Corrección %W)	106
Gráfico 16 Comparación de resultados de resistencia a compresión con diferentes cementos	107
Gráfico 17 Resistencia a la compresión de los cilindros con Politerm a 24 horas vrs densidad húmeda	112
Gráfico 18 Resistencia a la compresión de los cilindros con Politerm + aditivo acelerante de la resistencia a 24 horas vrs densidad húmeda	113
Gráfico 19 Resistencia a la compresión $F_{bm}$ vrs diseño de mezcla	114
Gráfico 20 Resistencia a la compresión a 24 horas vrs densidad seca	120
Gráfico 21 Resistencia a la compresión a 7 días vrs densidad seca	120
Gráfico 22 Resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) vrs densidad seca	121
Gráfico 23 Resistencia a la compresión promedio de los bloques ensayados (muestreo A y B)	122
Gráfico 24 Resistencia a la compresión máxima y mínima de los elementos ensayados (Muestreo A y Muestreo B)	123
Gráfico 25 Comparación de la mínima resistencia a la compresión con respecto a las máxima resistencia a la compresión de los bloques denominados muestreo A	124

Gráfico 26 Comparación de la mínima resistencia a la compresión con respecto a las máxima resistencia a la compresión de los bloques denominados muestreo B.....	124
Gráfico 27 Calibración con los datos del diseño de mezcla PC realizado en el laboratorio .....	126
Gráfico 28 Comparación de datos $f_c$ vrs densidad para lograr la calibración del equipo .....	127
Gráfico 29 Trazo de la curva de calibración entre los datos de "Mezcla TFG" y "Diseño PC Laboratorio" .....	128
Gráfico 30 Trazo de la curva de calibración entre los datos de "Mezcla TFG", "Diseño PC Laboratorio" y "Diseño PC masa" .....	129
Gráfico 31 Trazo de la curva de calibración entre los datos de "Mezcla TFG", "Diseño PC Laboratorio" y "Diseño PC masa", quitando el valor máximo y mínimo.....	130
Gráfico 32 Influencia del porcentaje de cemento en la resistencia a la compresión.....	132
Gráfico 33 Influencia del porcentaje de cemento en la resistencia a la compresión.....	132
Gráfico 34 Influencia del tipo de cemento en la resistencia a la compresión .....	134
Gráfico 35 Influencia del tipo de cemento en la resistencia a la compresión .....	134
Gráfico 36 Influencia del tipo de EPS en la resistencia a la compresión.....	136
Gráfico 37 Influencia del tipo de EPS en la resistencia a la compresión.....	137
Gráfico 38 Influencia del aditivo acelerante en la resistencia a la compresión .....	138
Gráfico 39 Influencia del aditivo acelerante en la resistencia a la compresión .....	139
Gráfico 40 Diferencia de la resistencia a la compresión a diferentes edades. ....	140
Gráfico 41 Ganancia de resistencia a la compresión con respecto a la resistencia obtenida a los 28 días. ....	141
Gráfico 42 Diferencia de la resistencia a la compresión de la masa mínima con respecto a la masa máxima .....	142
Gráfico 43 Diferencia de la resistencia a la compresión de la masa mínima con respecto a la masa máxima .....	142
Gráfico 44 Resistencia a la compresión $F_{bm}$ en función de la resistencia a la compresión de los cilindros de 5 cm x 10 cm $f_s$ .....	143
Gráfico 45 Resistencia a la compresión $F_{bm}$ en función de la resistencia a la compresión de los cilindros de 5 cm x 10 cm $f_s$ .....	144
Gráfico 46 Diferencia entre la predicción de la resistencia a la compresión de los bloque livianos con respecto a los bloques convencionales .....	145
Gráfico 47 Diferencia de la resistencia a la compresión con respecto a la resistencia mínima estipulada en el CSCR 2010 para bloques tipo A .....	145

## Índice de ecuaciones

(Ecuación 1) .....	21
(Ecuación 2) .....	27
(Ecuación 3) .....	27
(Ecuación 4) .....	27
(Ecuación 5) .....	28
(Ecuación 6) .....	28
(Ecuación 7) .....	28
(Ecuación 8) .....	29
(Ecuación 9) .....	29
(Ecuación 10) .....	30
(Ecuación 11) .....	36
(Ecuación 12) .....	37
(Ecuación 13) .....	64
(Ecuación 14) .....	70
(Ecuación 15) .....	88
(Ecuación 16) .....	90
(Ecuación 17) .....	93
(Ecuación 18) .....	96

## CAPÍTULO 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes del problema

En esta investigación, se pretende realizar una mezcla liviana de concreto seco para la elaboración de elementos de mampostería. Para obtener este tipo de mezcla se le adiciona poliestireno expandido (EPS) como agregado, con el fin de obtener un diseño de mezcla de aproximadamente  $1800 \text{ kg/m}^3$ , para ello se deben realizar pruebas variando el porcentaje de EPS adicionado al diseño de la mezcla hasta obtener las densidades deseadas. Una vez obtenidas estas densidades se deben realizar especímenes cilíndricos de concreto mediante la metodología que propuso Frasson Jr, para posteriormente comprobar si la resistencia a la compresión de dicha mezcla cumple para la elaboración de mampostería estructural.

Usualmente, las mezclas secas son utilizadas para la elaboración de elementos como bloques, adoquines, tubos, etc. Estos diseños de mezclas tienen la particularidad de que su contenido de humedad es relativamente bajo, como consecuencia de ello provoca que su trabajabilidad sea dificultosa, por ende, el asentamiento de este tipo de mezclas es cero o tiende a ser cero, debido a esta característica la colocación de la misma requiere de equipo especializado para lograr una apropiada extracción del contenido de aire que se encuentra atrapado en la mezcla, y además obtener una adecuada adherencia física entre las partículas del concreto.

Existen dos entidades encargadas de regular el proceso de la elaboración del concreto y procedimiento para la producción de los elementos de mampostería, las cuales son: el *American Concrete Institute* (ACI por sus siglas en inglés) y el *American Society of Testing Materials* (ASTM por sus siglas en inglés). Por su parte, cada entidad menciona la importancia de la selección de los agregados y una adecuada elaboración en el mezclado de los componentes con el fin de obtener una correcta composición de la mezcla de concreto. Estas entidades hacen énfasis en aspectos de importancia, respecto a la elaboración de elementos de mampostería de concreto tales como, la cantidad de material cementicio en la mezcla debe ser la adecuada para que la relación agua-cemento no se vea afectada, la compactación de la mezcla es primordial en este proceso, ya que al ser la mezcla con asentamientos cero no existe

una buena adherencia física entre las partículas, y por último, se refiere a un adecuado proceso de curado en los elementos para la obtención de la resistencia a la compresión esperada.

El ACI, en el comité 308, menciona la importancia que tiene el curado en el concreto, ya que esta práctica está directamente ligada a la obtención de la resistencia a la compresión que se desea alcanzar, a su vez, este comité hace referencia a diversos métodos posibles de curado que se pueden aplicar en el proceso del endurecimiento temprano del concreto, con el fin de mantener una adecuada humedad, evitar la pérdida de agua superficial, mantener una temperatura ideal en los elementos y además acelerar la ganancia de resistencia a la compresión utilizando la humedad y calor adicional de la mezcla recién colada.

## **1.2 Planteamiento del problema de investigación**

Se debe tomar en cuenta que los elementos de mampostería de concreto constan de un peso aproximado que oscilan entre los 10 kg y 15 kg la unidad, con esta investigación se pretende reducir el peso de estos elementos, con el fin de beneficiar su manipulación y transporte, tanto en la planta como en la obra.

¿Cómo se pretende reducir el peso de los elementos de mampostería de concreto?

Se conoce que para bajar el peso del concreto se debe reducir su densidad y en muchas ocasiones este proceso se logra con aditivos químicos, inclusores de aire, o incluso con la adición de agregados “livianos” como piedra pómez, sin embargo, existen otras metodologías que se pueden utilizar para lograr este objetivo.

En este proyecto se plantea agregar un porcentaje de poliestireno expandido (EPS) en la mezcla de concreto como un agregado no convencional, con el fin de alcanzar densidades menores a 2000 kg/m<sup>3</sup>. El impacto positivo que se puede generar al lograr un concreto liviano que cumpla con los estándares de calidad para la elaboración de mampostería, sería de gran beneficio para los operarios que, día a día, son los encargados de colocar cientos, sino, miles de estos elementos en su vida laboral, sin dejar de lado el gran avance tecnológico que esto implicaría en la industria de fabricación de mampostería.

### **1.3 Hipótesis**

Mediante una serie de experimentos y ensayos de laboratorio se pretende obtener un diseño de mezcla de concreto seco con una densidad cercana a los 1800 kg/m<sup>3</sup>, que cumpla con los requisitos necesarios para la elaboración de elementos de mampostería estructural.

### **1.4 Justificación del estudio de investigación**

El alto nivel de competitividad y la mejora continua en el campo de la construcción y la ingeniería civil, ha provocado una constante necesidad por la investigación e innovación de los materiales de construcción. Por esta razón, es necesario realizar estudios constantes del uso de los diferentes materiales y aplicaciones en las mezclas de concreto y sus derivados, ya que este material es el más utilizado para la construcción a nivel mundial.

Con la realización de este trabajo se pretende obtener una mezcla liviana que cumpla con los estándares de calidad para la elaboración de elementos de mampostería, lo que beneficiará significativamente la manipulación, el transporte y los procesos constructivos con esta modalidad.

Se considera que con esta investigación se beneficiará la industria de la construcción y producción de dichos elementos, así como la comunidad de ingeniería civil, la Universidad Latina de Costa Rica por su incremento en investigaciones, y por supuesto, el grupo empresarial Productos de Concreto S.A. por su interés y constante innovación en el desarrollo de concreto y sus aplicaciones.

## **1.5 Objetivo general**

Desarrollar una mezcla seca de concreto liviano mediante el uso de poliestireno expandido (EPS), para su implementación en la fabricación de elementos de mampostería de concreto estructural.

## **1.6 Objetivos específicos**

1. Evaluar las características y propiedades mecánicas del poliestireno expandido (EPS).
2. Obtener un diseño de mezcla con una densidad aproximada los  $1800 \text{ kg/m}^3$  mediante la adición de poliestireno expandido (EPS).
3. Determinar un diseño de mezcla óptimo mediante la variación del porcentaje de cemento.
4. Elaborar todo el proceso teórico y experimental para el diseño de mezcla.
5. Demostrar experimentalmente la composición de la resistencia a la compresión de los especímenes.

## **1.7 Alcances y limitaciones**

### **1.7.1 Alcances del proyecto**

Se toma el diseño de mezcla actual con el que Productos de Concreto fabrica los elementos de mampostería. A este diseño se le van a realizar modificaciones en composición de los agregados, adicionándole como agregado no convencional poliestireno expandido (EPS) para desarrollar una mezcla liviana. La cantidad de EPS adicionada se va a determinar para la obtención de una densidad aproximada a  $1800 \text{ kg/m}^3$ . Posteriormente se debe modificar el porcentaje de cemento con el fin de obtener el diseño óptimo para la fabricación de los elementos de mampostería de concreto estructural.



### **1.7.2 Limitaciones del proyecto**

El procedimiento que se va a implementar en el desarrollo del proyecto es un proceso que no se encuentra normado por ninguna entidad, y como consecuencia de ello, se debe implementar una metodología para realizar los ensayos, por lo que los márgenes de error en cada uno de estos ensayos se pueden ver altamente afectados. Por otra parte, el método propuesto por Frasson Jr al no estar normado y ser de poco conocimiento en el país, los técnicos del laboratorio de Productos de Concreto no cuentan con la experiencia apropiada para la elaboración de dichos ensayos. No obstante, cabe destacar que los técnicos del laboratorio de investigación y desarrollo de Productos de Concreto tienen amplia experiencia y conocimiento en el desarrollo de concretos.

Los moldes que se utilizarán para realizar los especímenes de los ensayos propuestos por Frasson Jr, tampoco están normados ni se pueden conseguir en el mercado, por lo que se fabricaron algunos de ellos, razón por la cual la cantidad de los moldes existentes son limitados, y como consecuencia de ello, la eficiencia y productividad de los especímenes se puede ver afectada.

Los diseños de mezclas propuestas para la fabricación de estos elementos de mampostería deben cumplir como mínimo con las características establecidas en la norma de INTECO, específicamente con la INTE C90 para cada tipo y clase de bloques, así como también debe cumplir con lo establecido en el Código Sísmico de Costa Rica 2010.

### **1.8 Impacto**

La mayoría de las construcciones en Costa Rica son realizadas con mampostería estructural, es por esta razón que el concreto de baja densidad para la elaboración de bloques es trascendental en el desarrollo tecnológico del concreto, ya que este material es uno de los más utilizados en la industria de la construcción, la cual se verá directamente beneficiada con la implementación de un concreto con las características propuestas en la presente investigación para la producción de elementos de mampostería en el país.

## **CAPÍTULO 2. Marco teórico**

### **2.1 Marco teórico-conceptual**

En este capítulo se proporcionará la información teórica necesaria para desarrollar con satisfacción el presente proyecto. Se profundizará en los términos técnicos y teóricos que se ven directa e indirectamente ligados con el tema a desarrollar. En esta sección se dará al lector la información necesaria, con el fin de facilitar la interpretación y brindarle una idea clara de lo que se desea desarrollar.

### **2.2 Caracterización del concreto**

El concreto se caracteriza por poseer elevada resistencia de esfuerzos a la compresión, la cual es una de las propiedades primordiales que ostenta. Sin embargo, se conoce que la resistencia a esfuerzos de tensión y flexión es significativamente menor a los esfuerzos a la compresión del mismo.

La capacidad del concreto depende directamente de factores químicos y físicos, ya que para la obtención de un buen concreto con capacidades adecuadas para la demanda solicitada, es importante tomar en cuenta la selección y calidad de los agregados, debido a que es aquí donde se da la adherencia de la pasta con las partículas de agregado, y cuanto mayor sea la adherencia de la pasta con el agregado mayor va a ser la resistencia del concreto. La dosificación del agua empleada en la mezcla es importante, ya que el proceso de endurecimiento del concreto inicia con la reacción química que se da del cemento al entrar en contacto con el agua, dando paso al endurecimiento y posterior fraguado. En el proceso de hidratación del concreto se da uno de los factores más importantes, ya que es aquí donde se adquiere la ganancia de la resistencia del mismo.

### **2.2.1 Resistencia a la compresión del concreto**

La resistencia a la compresión axial del concreto es determinada por la norma ASTM C39 (Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto). Este ensayo define la medida máxima de la resistencia del concreto bajo una carga axialmente aplicada, generalmente esta medida se da a los veintiocho días y se conoce como ( $f'_c$ ), no obstante, se pueden realizar ensayos a la compresión a diferentes edades con el fin de analizar la ganancia de resistencia a través del tiempo. Según lo indicado por (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004, pág. 8) la resistencia de un concreto elaborado con cemento Portland, a los siete días generalmente se estima en un 75% de la resistencia nominal a veintiocho días y las resistencias a edades de 56 y 90 días respectivamente son aproximadamente entre un 10% y 15% por encima de la resistencia a veintiocho días.

Para la obtención de la resistencia a esfuerzos a la compresión del concreto es necesario realizar especímenes cilíndricos. Generalmente los especímenes requeridos para este ensayo deben ser de diámetro de 100 mm x 200 mm de altura o bien sea con diámetro de 150 mm x 300 mm de altura, siempre y cuando no se especifique lo contrario. Cabe recalcar que para la presente investigación se van a realizar especímenes con diámetro de 50 mm x 100 mm de altura.

Sin embargo, en los concretos “secos” con baja relación agua-cemento los métodos de ensayos para la resistencia a la compresión de los elementos son realizados según la norma ASTM C140, la cual indica los métodos de ensayos y desempeños de los elementos prefabricados con concreto seco, como: bloques y adoquines.

### **2.2.2 Resistencia a la tracción o tensión del concreto**

El concreto, por su naturaleza, tiene baja resistencia a esfuerzos de tensión, es por esta razón que se utiliza concreto reforzado con acero, el cual proporciona al concreto la resistencia requerida a esfuerzos de tracción debido a su alto desempeño para trabajar bajo esfuerzos de tensión. Según lo mencionado por (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004, pág. 9).

La resistencia a la tensión (resistencia a la tracción, resistencia en tracción) directa del concreto es aproximadamente de 8% a 12% de la resistencia a compresión y se estima normalmente como siendo de 0.4 a 0.7 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión en megapascales o de 1.3 a 2.2 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kilogramos por centímetro cúbico.

### **2.2.3 Resistencia a la flexión del concreto**

La resistencia a la flexión o módulo de ruptura del concreto está definida por la norma ASTM C293 (Método de ensayo estándar para la resistencia a la flexión del hormigón, utilizando viga simple con carga en el punto central), normalmente se utiliza en pavimentos o losas. La resistencia a la compresión se utiliza para medir el módulo de ruptura del concreto, ya que esta es más fácil de medir. Por lo tanto, se toma esta medición como un índice para determinar la resistencia a la flexión del concreto. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004, pág. 9), explica que la resistencia a flexión de concreto de peso normal es normalmente de 0.7 a 0.8 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en megapascales o de 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kilogramos por centímetro cuadrado.

### **2.2.4 Curado del concreto**

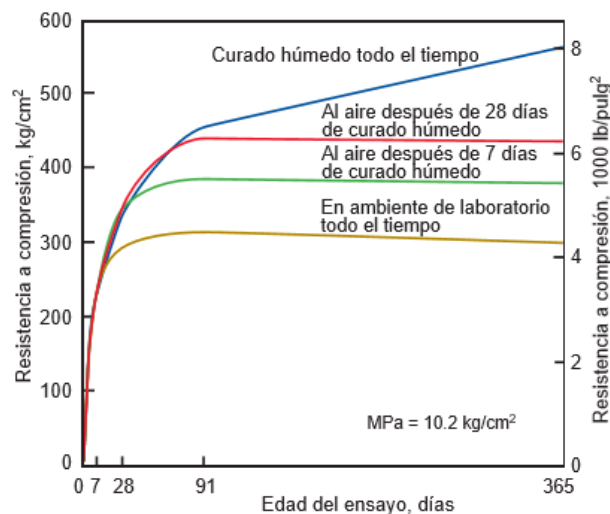
El curado del concreto es definido por el ACI 308R-01 como el proceso mediante el cual el cemento hidráulico del concreto madura y se desarrolla, mostrando propiedades de endurecimiento como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de agua y calor suficiente.

La importancia del curado en el concreto recién mezclado es uno de los procedimientos más importantes, ya que un adecuado sistema o método de curado va a impactar positivamente en las propiedades físicas y mecánicas del concreto endurecido, por ejemplo, un adecuado método de cura en el concreto hace que tenga mayor resistencia a esfuerzos de compresión, resistencias mayores a la abrasión, durabilidad, impermeabilidad y hasta una adecuada estabilidad dimensional del elemento. El desarrollo de estas propiedades físicas y mecánicas

del concreto se da generalmente en los primeros días, posterior a la colocación del concreto en estado fresco, por esta razón se debe realizar un adecuado método de cura durante al menos los primeros veintiocho días, edad donde el concreto presenta la máxima obtención de resistencia a compresión. Sin embargo, el American Concrete Institute (ACI) en su comité 301 da la recomendación para el curado del concreto por un periodo mínimo correspondiente a un 70% de la resistencia a compresión especificada para el concreto. Generalmente el concreto logra alcanzar un 70% de la resistencia a compresión especificada a los siete días de curado.

El gráfico 1 muestra la influencia del curado húmedo del concreto sobre el desarrollo de la resistencia a esfuerzos de compresión del concreto.

*Gráfico 1. Efecto del tiempo de curado húmedo sobre el desarrollo de la resistencia del concreto*



Fuente: Diseño y control de mezclas de concreto, 2004

En el gráfico anterior se puede observar como el concreto con un adecuado método de cura alcanza importante resistencia a la compresión en los primeros siete días, y su resistencia sigue incrementando considerablemente hasta los veintiocho días.

### 2.3 Concreto seco

Este tipo de concreto tiene la característica de tener asentamiento cero y por lo tanto se requiere de equipo especializado para la extracción de vacíos de aire en la mezcla. El concreto

seco, por sus características, debe ser colocado con vibro-compactación, al ser un concreto de rápido desmolde usualmente es utilizado para la elaboración de productos prefabricados tales como bloques, adoquines, tuberías entre otros. (Hincapié Henao & Montoya Góez, 2005).

Por su composición, el concreto seco tiene la característica de tener un porcentaje de humedad relativamente baja con respecto a los concretos convencionales, sin embargo, al igual que todas las mezclas de concreto, las leyes básicas que regulan las propiedades del concreto con asentamientos elevados, también forman parte para concretos con asentamientos cero, por ejemplo la relación agua-cemento es el principal factor de las propiedades del concreto endurecido, ya que esta influye directamente en la resistencia a la compresión del mismo. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Según el artículo mencionado por (Hincapié Henao & Montoya Góez, 2005), afirma que “El concreto seco vibro-compactado es una mezcla de cemento Pórtland, agregados, agua, y en algunos casos, aditivos y adiciones. La literatura menciona que la relación A/C para estos concretos puede estar por debajo de 0,4 (Paakkinen, 1986); sin embargo, esto no es del todo cierto, pues la cantidad de agua en la mezcla depende de la superficie específica de los agregados”.

Por otra parte, (Frasson Jr, Metodologia de dosagem para blocos de concreto, 2000), afirma que la humedad que se utiliza en este tipo de mezclas secas es primordial, generalmente los porcentajes utilizados oscilan entre el 5.0% al 8.0%. Sin embargo, diversos autores afirman que la cantidad de agua utilizada en una mezcla para la producción de mampostería de concreto debe ser la mayor posible, siempre que esta no afecte en el desmolde del elemento como consecuencia de la adhesión, o bien que exista la pérdida de forma de las piezas realizadas.

Este concreto a diferencia de los convencionales no sigue rigurosamente la Ley de Abrams en relación con la proporción de agua-material cementante, y como consecuencia de ello la influencia que tiene en la resistencia a la compresión. Generalmente para este tipo de mezclas las cuales son muy utilizadas para la producción de elementos de mampostería de concreto se dice que cuanto mayor sea su relación de agua-material cementante la resistencia mecánica del producto final tiende a aumentar, esto se da debido a que a mayor contenido de agua la mezcla

va a tener una mayor plasticidad y por lo tanto se facilita la vibro-compactación del material, por ende, se genera una menor cantidad de vacíos en el elemento final.

(Marchand, 1996), señala que el concreto seco es de una consistencia significativamente mayor a la que presenta el concreto plástico, debido a la menor cantidad de agua utilizada que permitirá la extracción inmediata de las piezas.

## **2.4 Mezclas livianas**

Las mezclas livianas se clasifican en concretos con densidades menores a los concretos convencionales, este tipo de concreto se puede obtener mediante la combinación de agregados livianos con agregados de peso normal, según lo afirmado por (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004) “El concreto ligero (liviano) estructural es un concreto similar al concreto de peso normal, excepto que tiene una densidad menor. Se lo produce con agregados ligeros (concreto totalmente ligero) o con una combinación de agregados ligeros y normales” pág 375.

El mismo autor menciona que “El concreto ligero estructural tiene una masa volumétrica seca al aire (masa unitaria, densidad) que varía de 1350 a 1850 kg/m<sup>3</sup> (85 a 115 lb/pie<sup>3</sup>) y una mezcla de concreto ligero estructural, se mojan los agregados (pero no se los satura) antes de la dosificación” (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Sin embargo, existen estudios donde se han desarrollado concretos livianos con agregados no convencionales, como es el poliestireno expandido (EPS por sus siglas en inglés). En el desarrollo de este tipo de concreto además de suficiente resistencia mecánica, se busca un buen poder de aislamiento térmico y acústico del mismo, poca absorción de humedad y buena capacidad para su elaboración con equipo usual en la construcción.

El concreto liviano desarrollado con EPS puede presentar algunas desventajas, ya que existe la posibilidad de que las partículas de poliestireno expandido no queden totalmente rellenas entre esfera y esfera con los aglutinantes y agregados de la mezcla, provocando una inadecuada adherencia entre las partículas, y por consecuencia de ello, baja resistencia a esfuerzos de compresión. Por esta razón algunas investigaciones recomiendan incorporar algún aglutinante disponible sobre las partículas de EPS con el fin de crear un recubrimiento

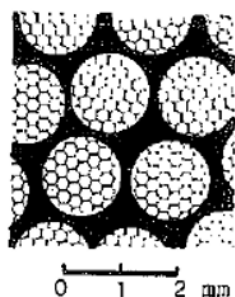
uniforme en las perlas de poliestireno expandido para que se unan y homogenicen con el resto de la mezcla de concreto.

Según lo mencionado en el informe realizado por (BASF, 2014, pág. 1) “Si las perlas de styropor se recubren uniformemente con una capa de aglutinante y se unen en el mismo proceso con el resto del cemento, arena y agua, se produce una estructura con cavidades esféricas con una estructura de burbujas que están unidas en todas direcciones. Debido a la acción de bóveda de las paredes celulares de la estructura del hormigón que se apoyan entre sí, se obtiene una resistencia relativamente elevada”.

A continuación, se muestran imágenes con la distribución de las partículas.

En la ilustración 1 se puede observar un adecuado recubrimiento y rellenos de los espacios entre las perlas de EPS

*Ilustración 1. Partículas adecuadamente rellenas entre las perlas de EPS*

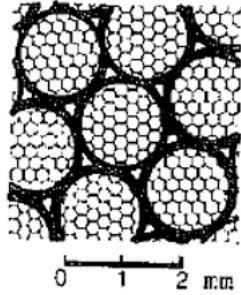


Fuente: Elaboración de Hormigón ligero a partir de Styromix

En la ilustración 2 se puede observar que no hay ningún relleno de los espacios residuales vacíos, aunque cuenta con buena resistencia debido al efecto de bóveda.



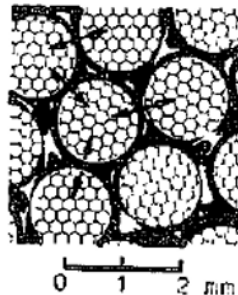
*Ilustración 2. Partículas de EPS sin relleno entre si*



Fuente: Elaboración de Hormigón ligero a partir de Styromix

En la ilustración 3 se puede mostrar una mala elaboración, ya que las partículas están mal recubiertas y parcialmente no tienen ninguna acción de bóvedas, ya que el aglutinante está entre los espacios residuales lo que causa una disminución de la resistencia.

*Ilustración 3. Mal recubrimiento entre las partículas*



Fuente: Elaboración de Hormigón ligero a partir de Styromix

Los adhesivos que recomiendan utilizar son aquellos que están elaborados a base de dispersiones de plásticos y resinas sintéticas, que no intervengan desfavorablemente sobre las propiedades del aglutinante hidráulico, y que tampoco disuelva las partículas de poliestireno expandido.

## **2.5 Poliestireno expandido (EPS)**

### **2.5.1 Definición de EPS**

El poliestireno expandido o EPS por sus siglas en inglés (expanded polystyrene), son pequeñas partículas esféricas también llamadas perlas, generalmente son de color blanco, las cuales presentan una estructura celular cerrada llena de aire, se estima que cada perla contiene aproximadamente 3000 celdas cerradas que están rellenas de aire, por ende, permite que las partículas sean sumamente livianas, con masas tendiendo a cero, lo que también hace de la partícula una estructura prácticamente impermeable, se estima que las perlas de EPS contienen únicamente un 2% de poliestileno y un 98% de aire, por lo tanto hace de estas partículas de peso muy ligero. (Orozco Ronquillo , 2015).

Las partículas de poliestireno expandido se consiguen por medio de polimerización del estireno con introducción del agente de expansión llamado pentano, como se mencionó anteriormente este polímero se presenta en forma de perlas esféricas de diferentes diámetros.

### **2.5.2 Aplicaciones del EPS**

El EPS tiene una amplia gama de aplicaciones. Generalmente se utilizan para empaques de envasado y embalado de productos ya que cuenta con grandes propiedades en la absorción de impactos. Sin embargo, los productos a base de EPS también son comúnmente utilizados en aplicaciones como bloques para pared, paneles de aislamiento térmico y acústico. Algunas aplicaciones adicionales incluyen ICF's ("insulated concrete forms"), moldeado de piezas de pared delgada y molduras para acabados en la construcción.

### **2.5.3 Características físicas y mecánicas del EPS**

A continuación, se mencionan algunas de las características físicas y mecánicas del poliestireno expandido según lo indicado por (Almeida Avila , 2014).

- Amortiguador de impactos
- Resistencia al agua, pero no al vapor. Poca o nula absorción de agua.

- Aislante térmico y acústico
- Bajo peso de las partículas
- Resistencia química
- Facilidad de manipulación
- Resistencia al envejecimiento
- Biológicamente inerte, no contamina aguas
- Facilidad de pigmentación
- Reutilizable al 100%

## **2.6 Materiales que constituyen las mezclas de concreto**

### **2.6.1 Cemento hidráulico**

Los cementos portland que se producen deben de obedecer a las normativas existentes las cuales se especifican en la ASTM C150, AASHTO M85 o ASTM C1157.

Los cementos son conglomerantes hidráulicos, ya que es un producto que al mezclarse con agua forma una pasta que fragua y endurece, dando lugar a productos mecánicamente resistentes. (ICCYC, 2009).

Según lo afirmado por (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004, pág. 25) “Los cementos Portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio, los cementos hidráulicos se fraguan y se endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta”.

En la industria existen diversos tipos de cementos, los cuales se adaptan a la necesidad de cada proyecto en específico, cabe destacar que este es el material de construcción más utilizado en el mundo.

En la tabla 1 se puede observar los diferentes tipos de cementos que hay en el mercado.

*Tabla 1. Tipos de cemento hidráulico*

Tipo I	Cemento Portland ordinario
Tipo ME	Cemento Hidráulico Modificado con Escoria de Alto Horno
Tipo MF	Cemento Hidráulico Modificado con Humo de Sílice
Tipo MP	Cemento Hidráulico Modificado con Puzolana, Ceniza volante o Esquisto
Tipo MC	Cemento Hidráulico Modificado con Caliza
Tipo MM	Cemento Hidráulico Modificado Mixto

Fuente: INTECO

Donde:

- Tipo I/ MM: Normal; de uso general; no requiere propiedades especiales; utilizado para edificios, estructuras industriales y conjuntos habitacionales.
- Tipo MP/A-28: Moderada resistencia a los sulfatos; para uso en exposición a suelos y aguas subterráneas que tienen un bajo contenido de sulfatos; utilizado para puentes, tuberías de cobre, muelles y muros de contención.
- Tipo MC/A-AR: Desarrolla altas resistencias iniciales; utilizado en condiciones donde se requiere resistencia a edades tempranas, en lugares fríos y que se necesite un rápido desencofrado; empleado para carreteras y autopistas.
- Tipo MF/A-28: Bajo calor de hidratación; se usa cuando el calor durante el proceso de hidratación debe ser mínimo y en grandes presas donde se colocan grandes volúmenes de concreto.
- Tipo MP/B-28: Alta resistencia a los sulfatos; se usa en un concreto que estará en contacto con altas concentraciones de sulfatos; utilizado en obras marinas, aguas con alto contenido de sulfatos, drenajes, canales y ambientes muy agresivos.

## **2.6.2 Agregados**

Los agregados para la elaboración de la mezcla conforman una de las partes más importantes en el concreto, por lo tanto, este material no debe ser subestimado ya que es el que contiene la mayor parte de la mezcla, estos materiales conforman entre un 60% a un 75% del volumen total del concreto, por esta razón es de vital importancia la selección de los mismos, la calidad y el tipo de agregado, ya que ellos influyen directamente en las propiedades de la mezcla, tanto en el estado fresco como endurecido, así como en las propiedades del concreto y la economía del mismo (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

El mismo autor señala la diferencia que existe entre los dos tipos de agregado que son utilizados con mayor frecuencia en los diseños de mezclas de concreto, los cuales se denominan agregado grueso y agregado fino, siendo el fino el que tiene un tamaño máximo de 5 mm (tamiz #4) y generalmente consiste de arenas naturales o piedra trituradas, mientras que el agregado grueso se clasifica por tamaños mayores a 5 mm y generalmente se encuentra entre 9.5 mm (tamiz  $\frac{3}{8}$  pulg) y 37.5mm (tamiz  $1\frac{1}{2}$  pulg) los cuales constan de partículas de piedra triturada (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004, pág. 103).

### **2.6.2.1 Granulometría en los agregados**

La granulometría es el ensayo que se realiza para definir la distribución de las partículas de un agregado fino o grueso, el cual debe de cumplir con la norma ASTM C136, donde los tamaños de dichas partículas se determinan por medio de las mallas o los tamices. Este ensayo se lleva a cabo para obtener un material lo más heterogénea posible con el fin de evitar grandes vacíos en el concreto. (Lanamme/UCR, 2017).

### **2.6.2.2 Granulometría para agregado fino**

Esta granulometría debe de respetar lo establecido en la norma ASTM C33 la cual delimita los límites granulométricos permitidos para los agregados.

En la siguiente tabla se muestran los límites granulométricos permitidos para agregado fino.

*Tabla 2. Límites granulométricos del agregado fino*

Tamiz (especificación E 11)	Porcentaje que pasa
9,5 mm (3/8-in)	100
4,75-mm (No 4)	95 a 100
2,36-mm (No 8)	80 a 100
1,18-mm (No. 16)	50 a 85
600- $\mu$ m (No 30)	25 a 60
300- $\mu$ m (No 50)	5 a 30
150- $\mu$ m (No 100)	0 a 10
75- $\mu$ m (No 200)	0 a 3 <sup>A,B</sup>

<sup>A</sup> Para el concreto no sujeto a la abrasión, el límite para el material más fino que el tamiz 75  $\mu$ m (No 200) será de 5% como máximo

<sup>B</sup> Para agregado fino fabricado, si el material más fino que el tamiz 75  $\mu$ m (No 200), se compone de polvo de piedra, esencialmente libre de arcilla o lutita, este límite será el 5% como máximo para hormigón sujeto a la abrasión, y el 7% como máximo para el concreto no sujeto a la abrasión

Fuente: INTECO, INTE C15

### **2.6.2.3 Granulometría de agregado grueso**

La granulometría de agregado grueso, al igual que la granulometría de agregado fino está establecida por la norma ASTM C33, la cual determina los límites permitidos para los agregados.

El tamaño máximo de agregado grueso se ve influenciado directamente en la economía de la mezcla, ya que al ser partículas de mayor tamaño estas van a requerir más cantidad de agua y cemento, debido a que a mayor tamaño en el agregado mayor área superficial, es por esta razón que la selección del material debe de elegirse muy bien.

En la tabla - 3 se muestran los límites granulométricos permitidos para agregado grueso.

*Tabla 3. Requisito granulométrico para agregado grueso*

Tamaño nominal (tamiz con aberturas cuadradas)	Cantidades más finas que cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), porcentaje en masa													
	100 mm (4in.)	90mm (3½ in.)	75 mm (3in.)	63 mm (2½ in.)	50 mm (2 in.)	37,5 mm (1½ in.)	25,0 mm (1 in.)	19,0 mm (¾ in.)	12,5 mm (½ in.)	9,5 mm (3/8 in.)	4,75 mm (No. 4)	2,36 mm (No. 8)	1,18 mm (No. 16)	300 µm (No.050)
90 a 37.5 mm (3½ a 1½ in)	100	90 a 100	***	25 a 60	***	0 a 15	***	0 a 5	***	***	***	***	***	***
63 a 37,5 mm (2½ a 1½ ")	***	***	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	***	0 a 5	***	***	***	***	***	***
50 a 25,0 mm (2 a 1 ")	***	***	***	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	***	0 a 5	***	***	***	***	***
50 a 4,75 mm (2 " a No 4)	***	***	***	100	95 a 100	***	35 a 70	***	10 a 30	***	0 a 5	***	***	***
37,5 a 19,0 mm (1½ to ¾ ")	***	***	***	***	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	***	0 a 5	***	***	***	***
37,5 a 4,75 mm (1½ " a No. 4)	***	***	***	***	100	95 a 100	***	35 a 70	***	10 a 30	0 a 5	***	***	***
25,0 a 12,5 mm (1 a ½ ")	***	***	***	***	***	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	***	***	***	***
25,0 a 9,5 mm (1 a 3/8 ")	***	***	***	***	***	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	***	***	***
25,0 a 4,75 mm (1 " a No. 4)	***	***	***	***	***	100	95 a 100	***	25 a 60	***	0 a 10	0 a 5	***	***
19,0 a 9,5 mm (3/4 a 3/8 ")	***	***	***	***	***	***	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	***	***	***
19,0 a 4,75 mm (3/4 " a NO. 4)	***	***	***	***	***	***	100	90 a 100	***	20 a 55	0 a 10	0 a 5	***	***
12,5 a 4,75 mm (1/2 " a No 4)	***	***	***	***	***	***	***	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	***	***
9,5 a 2,36 mm (3/8 " a No.8)	***	***	***	***	***	***	***	***	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	***
9,5 a 1,18 mm (3/8 " a No. 16)	***	***	***	***	***	***	***	***	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
4,75 a 1,18 mm (No. 4 a No. 16)	***	***	***	***	***	***	***	***	***	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

Fuente: INTECO, INTE C15

## 2.7 Agua

El agua que se utiliza para la elaboración de la mezcla de concreto está supervisada bajo las especificadores y parámetros descritos en la norma INTE C92 la cual explica la importancia fundamental de la misma, debido a que si esta presenta gran cantidad de impurezas puede llegar a afectar directamente el tiempo de curado, afectación en la resistencia del concreto, corrosión en el acero de refuerzo del concreto, reducción de la durabilidad e inestabilidad en el volumen del concreto. Es por esta razón que el agua utilizada para la elaboración de concreto debe cumplir con ciertas características fisicoquímicas y

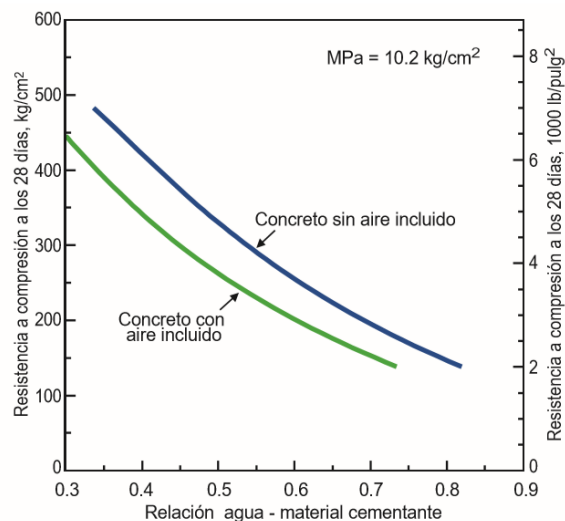
bacteriológicas, las cuales determinan las limitaciones para los sulfatos, cloruros, álcalis y sólidos permitidos en el agua. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

## 2.8 Relación agua-cemento

Recordemos que la relación agua-cemento y el grado de la hidratación de la mezcla de concreto, determina la porosidad de la pasta una vez endurecida. Es por eso, que para cualquier etapa del proceso de hidratación, el volumen de vacíos en el concreto endurecido dependen directamente tanto de la relación agua-cemento como del grado de compactación obtenido en la mezcla.

Por su parte, (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004), pone a disposición una serie de tablas y gráficas como las que se presentarán a continuación, la cual propone valores aproximados para la determinación de la relación agua-cemento mediante una resistencia promedio requerida ( $f'c$ ), estos valores fueron obtenidos mediante una serie de ensayos previamente realizados para mezclas de prueba en las cuales no se cuenta con información adicional.

*Gráfico 1 Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua-material cementante para el concreto con agregado grueso de tamaño máximo nominal de 19 mm a 25 mm (3/4 a 1 pulg.).*



Fuente: Diseño y control de mezclas de concreto, 2004



Sin embargo, se conoce que el vínculo existente entre la resistencia y la relación agua-cemento esta atribuida a Duff Abrams, quien estableció una ecuación donde una serie de constantes empíricas ( $k_1$ ,  $k_2$ ) dependen de la edad del concreto, del tiempo de curado, del régimen de curación utilizado, la clase de cemento, el aire, y del tipo y tamaño del árid.

Ecuación de Abrams:

$$R_c = \frac{k_1}{k_2^c} \quad (\text{Ecuación 1})$$

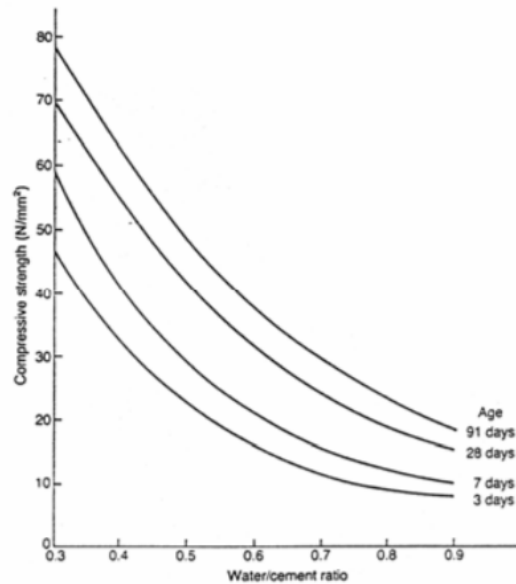
Donde:

$R_c$ = resistencia a la compresión (N/mm<sup>2</sup>)

$a/c$ = relación agua-cemento (tomada en volumen)

Por lo tanto, en la siguiente gráfica se puede determinar que cuanto mayor sea la relación agua-cemento en la mezcla, menor va a ser la resistencia del concreto, ya que al haber más agua que la requerida para la hidratación del cemento, esta va a ocupar mayor volumen en la mezcla y como consecuencia de ello el concreto va a presentar mayor cantidad de vacíos al evaporarse el agua excedente.

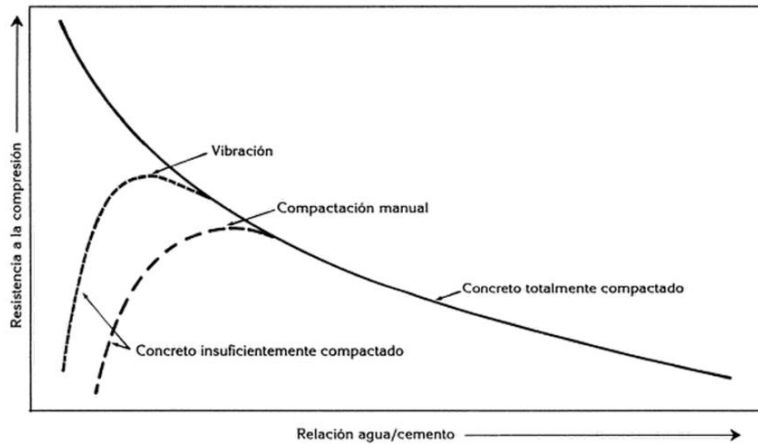
Gráfico 2. Efecto típico de la edad y de relación a/c en la resistencia del hormigón (cemento portland, grava rodada)



Fuente: (Garcia Pérez , 2004)

No obstante, se debe de tomar en cuenta que en una mezcla de concreto seca o con muy bajo contenido de humedad, su resistencia no depende únicamente de la relación agua-materia cementante, sino también de una adecuada compactación del concreto, ya que si el concreto no recibe una óptima compactación la resistencia del mismo tiende a caer considerablemente debido a la cantidad de vacíos que quedan en la mezcla, lo que provoca un aumento en las existencias de superficies de fallas en la mezcla una vez endurecida. (Sánchez De Guzmán, 2001).

Gráfico 3. Resistencia del concreto contra la relación a/c, para diferentes grados de compactación



Fuente: (Sánchez De Guzmán, 2001)

Como se menciona anteriormente, en la gráfica 4 se puede observar claramente como una inadecuada compactación en el concreto afecta significativamente la resistencia a la compresión del mismo. Por la tanto si en los elementos de mampostería no se obtiene una adecuada vibro-compactación la resistencia a la compresión del block caerá súbitamente, ya que esta depende directamente de la vibración.

## 2.9 Vibro-compactación en el concreto

Esta modalidad es comúnmente utilizada en la fabricación de una alta gama de productos prefabricados, los cuales tienen como característica la utilización de concretos con bajos contenidos de humedad y asentamientos nulos o tendientes a cero, es por esta razón que se debe de utilizar el sistema de vibro-compactación para obtener una adecuada conformación de los elementos, tanto en el aspecto del acabado final como en sus características mecánicas.

Aunque los elementos fabricados bajo esta tecnología difieren en sus dimensiones, formas y hasta en las proporciones de sus materiales constituyentes y métodos de fabricación, todos ellos comparten una característica similar, la cual es el desmolde inmediato del elemento debido a que la mezcla utilizada tiene asentamiento nulo.

El sistema de vibro-compactación en los elementos consiste en la aplicación de vibraciones y presiones mecánicas sobre el concreto, esto permite que la pasta se desplace de manera uniforme por las partículas de los agregados, logrando de este modo una adecuada cohesión en la mezcla de concreto. Además, este tipo de mezcla al tener muy bajo contenido de humedad y ser sometida a vibro-compactaciones permite un desmolde del elemento de manera inmediata como se mencionó anteriormente, lo que optimiza de manera eficiente la producción de los elementos.

## **2.10 Bloques de concreto**

Los bloques de concreto son pequeños elementos prefabricados, los cuales son moldeados previamente mediante un sistema de vibro-compactación debido a que la mezcla que se utiliza para la elaboración de estas piezas contiene una baja relación de agua-cemento, es por este motivo que se requiere de un sistema como el mencionado anteriormente para obtener una adecuada resistencia mecánica del elemento, así como el acabado y compacidad requerida de la pieza.

Por otra parte, la norma nacional INTE C90 define como bloque de concreto, “un elemento fabricado de concreto, cuya área neta de la sección transversal, en cualquier plana paralelo a la superficie que contenga núcleos, celdas o muescas (hendiduras), es menor que el 75% del área bruta de su sección transversal medida en el mismo plano”. (INTECO, 2007).

### **2.10.1 Clasificación y requisitos de las unidades de mampostería huecas de concreto según la norma INTE C90**

Esta norma indica que los bloques de concreto deben de clasificarse según sus características físicas y mecánicas, en clase A, clase B y clase C, según sea su resistencia a la compresión y absorción del elemento. Estos se presentarán en la tabla 4 y tabla 5 de este proyecto. No obstante, dichos elementos también deben cumplir con una serie de espesores mínimos permitidos de las paredes externas e internas, según se clasifican en la tabla 6 de la presente investigación.

Tabla 4. Resistencia mínima a la compresión sobre el área neta a los 28 días

Clase	Resistencia mínima a la compresión MPa	
	Promedio de 3 o más unidades	Unidad individual
A	13,0	11,8
B	8,8	7,8
C	7,4	6,8

Fuente: INTE C90

Tabla 5. Absorción según tipo de bloque

Clase	Absorción			
	Expresada en % <sup>1)</sup>	Valor máximo individual (%)	Expresada en kg/m <sup>3</sup>	Valor máximo individual kg/m <sup>3</sup>
A	≤10	11	≤ 196	218
B	≤11	12	≤ 218	237
C	≤ 14	15	≤ 277	297

Fuente: INTE C90

Tabla 6. Espesores mínimos de pared

Ancho nominal del bloque de concreto <sup>1)</sup> (mm)	Espesor mínimo <sup>2)</sup> mm		
	Paredes externas	Paredes internas	Espesor equivalente de pared interna <sup>3)</sup> (mm/m)
120	19	19	136
150	25	25	188
200	32	25	188
250	35	29	209
300	38	29	209

**Nota <sup>1)</sup>** Para uso estructural, se limita la dimensión del ancho de la unidad del bloque a un valor mínimo de 12 cm.  
**Nota <sup>2)</sup>** Se considera el valor promedio de tres unidades, medidas en el punto más angosto de la pared.  
**Nota <sup>3)</sup>** El espesor equivalente de la pared interna no aplica a aquella parte de la unidad que va a ser rellena de concreto. La longitud de esa porción deberá ser reducida de la longitud total de la unidad para el cálculo del espesor equivalente de pared interna.

Fuente: INTE C90

### **2.10.2 Clasificación y requisitos de las unidades de mampostería huecas de concreto según el Código Sísmico de Costa Rica 2010**

Clase A: Bloques de concreto con resistencia promedio a la compresión, medida sobre el área neta a los veintiocho días de edad, no menor que  $133 \text{ kg/cm}^2$  y con un mínimo para cada muestra individual de  $120 \text{ kg/cm}^2$ . La mampostería clase A es obligatoria para todas las construcciones con área mayor que  $1000 \text{ m}^2$  y de tres pisos de altura.

Clase B: Bloques de concreto con resistencia promedio a la compresión, medida sobre el área neta a los veintiocho días de edad, no menor que  $90 \text{ kg/cm}^2$  y con un mínimo para cada muestra individual de  $80 \text{ kg/cm}^2$ .

Clase C: Bloques de concreto con resistencia promedio a la compresión, medida sobre el área neta a los veintiocho días de edad, no menor que  $75 \text{ kg/cm}^2$  y con un mínimo para cada muestra individual de  $70 \text{ kg/cm}^2$ .

### **2.11 Muestreo y métodos de ensayo de unidades de mampostería de concreto según norma INTE C50**

Dicha norma nacional concierne de manera parcial a la norma internacional ASTM C140-14b, la cual se refiere a los métodos de ensayos y procedimientos de los mismos, con el fin de evaluar las características físicas y mecánicas de los elementos de mampostería estructural de concreto. Los métodos que se estudiarán abarcan el muestreo y los ensayos para determinar las dimensiones, resistencia a la compresión, absorción, densidad y contenido de humedad.

## 2.11.1 Cálculos para unidades de mampostería según norma INTE C 50

### 2.11.1.1 Absorción

El cálculo de la absorción se debe de calcular mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Absorción, kg/m}^3 = [(W_s - W_d)/(W_s - W_i)] \times 1000 \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\text{Absorción. \%} = [(W_s - W_d)/W_d] \times 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde

$W_s$  = Peso saturado del espécimen, kg

$W_i$  = Peso sumergido del espécimen, kg

$W_d$  = Peso seco al horno del espécimen, kg

### 2.11.2 Contenido de humedad

Para el cálculo del contenido de humedad del espécimen de mampostería se debe de realizar en el momento del muestreo, cuando  $W_r$  es medido como se indica a continuación.

$$\text{Contenido de Humedad, \% de la absorción tota} = \left[ \frac{W_r - W_d}{W_s - W_d} \right] \times 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde

$W_r$  = Peso recibido de la unidad, kg

$W_d$  = Peso seco al horno del espécimen, kg

$W_s$  = Peso saturado del espécimen, kg

### 2.11.3 Densidad del espécimen

Para el cálculo de la densidad seca al horno se debe de seguir la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad, } (D), \text{ kg/m}^3 = [W_d / (W_s - W_i)] \times 1000 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde

$W_d$  = Peso seco al horno del espécimen, kg

$W_s$  = Peso saturado del espécimen, kg

$W_i$  = Peso sumergido del espécimen, kg

### 2.11.4 Cálculo del área neta promedio

Se calcula el área neta promedio como sigue:

$$\text{Volumen Neto } (V_n), \text{ cm}^3 = (W_d / D) \times 10^6 = (W_s - W_i) \times 10^3 \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\text{Área neta promedio } (A_n), \text{ mm}^2 = (V_n \times 10^3) / H \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde

$V_n$  = Volumen neto del espécimen,  $\text{cm}^3$

$W_d$  = Peso seco al horno del espécimen, kg

$D$  = Densidad seca al horno del espécimen,  $\text{kg/m}^3$

$W_s$  = Peso saturado del espécimen, kg

$W_i$  = Peso sumergido del espécimen, kg

$A_n$  = Área neta promedio del espécimen,  $\text{mm}^2$

$H$  = Altura promedio del espécimen, mm



Las unidades de cálculo deben de ser las del sistema internacional SI, exceptuando el cálculo del área neta ya que para fines prácticos se estiman en mm<sup>2</sup> para facilitar el cálculo del esfuerzo a la compresión del espécimen en MPa, el cual es definido como N/mm<sup>2</sup>.

### 2.11.5 Cálculo del área bruta

En la siguiente ecuación se muestra cómo se debe calcular el área bruta del espécimen:

$$\text{Área bruta } (A_b), \text{mm}^2 = L \times W \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde

$A_b$  = Área bruta del espécimen, mm<sup>2</sup>

$L$  = Longitud promedio del espécimen, mm

$W$  = Ancho promedio de la fracción o espécimen, mm

El área bruta de la sección transversal del espécimen es el área total de la sección perpendicular a la dirección de aplicación de la carga, incluyendo áreas dentro de las celdas y los espacios entrantes, a menos que estos espacios vayan a ser ocupados en la mampostería por porciones de mampostería adyacente.

### 2.11.6 Resistencia a la compresión sobre el área neta

Se calcula la resistencia a la compresión como sigue:

$$\text{Resistencia a la compresión sobre el área neta (MPa)} = P_{max} / A_n \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde

$P_{max}$  = La carga máxima a la compresión, N

$A_n$  = Área neta promedio del espécimen, mm<sup>2</sup>

### **2.11.7 Resistencia a la compresión sobre el área bruta**

$$\text{Resistencia a la compresión sobre el área bruta (MPa)} = \frac{P_{max}}{A_g} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde

$P_{max}$  = La carga máxima a la compresión, N

$A_b$  = Área bruta promedio del espécimen, mm<sup>2</sup>

## **2.12 Método de diseño de mezclas de concreto para mampostería estructural propuesto por Frasson Jr**

### **2.12.1 Método de Frasson Jr**

Frasson Jr desarrolló un método en el cual se reduce la cantidad de pruebas en las industrias, lo cual hace que se reduzca considerablemente el costo y tiempo en el diseño de mezclas para la fabricación de elementos de mampostería de concreto, anterior a este método las pruebas que se realizaban eran sumamente costosas, arduas y demandantes de tiempo en las plantas concreteras, ya que estos diseños se deben de hacer a nivel industrial los cuales son realizados por los fabricantes de las máquinas productoras. (Frasson Jr, Metodología de dosagem para bloco de concreto, 2000).

El método propuesto por Frasson Jr se basa en el modelo de especímenes de concreto en moldes cilíndricos de 5 cm x 10 cm en el laboratorio. Al utilizar la metodología propuesta por Frasson se puede evaluar la cohesión y el contenido de agua óptimo del concreto, así como también se puede predecir la textura superficial del elemento y la resistencia a la compresión del mismo, siendo esta última una función de la densidad en estado fresco. (Frasson Jr, Casali, Oliveira , & Prudencio Jr, 2012).

El equipo que se utiliza para desarrollar este método consta de:

- Molde tri-panel de 5 cm x 13 cm, hecho de tres paneles laterales curvados unidos por una prensa.
- Base de acero de 7,61 cm de diámetro por 2,05 cm de altura.
- Barra compactadora convencional utilizada para la compactación del mortero (cuyas dimensiones son las siguientes, altura total de la barra 16.98 cm, altura de la cabeza de la barra 3.5 cm, diámetro de la cabeza de la barra 2.49 cm, altura del sujetador de la barra 13.48 cm, diámetro del sujetador de la barra 1.59 cm)
- Embudo de lámina de acero (cuyas dimensiones son las siguientes, altura 9.44 cm, diámetro mayor 7.69 cm, diámetro menor 3.34 cm)
- Protector de nylon (cuyas dimensiones son las siguientes, altura mayor 7.06 cm, diámetro mayor 6.99 cm, altura menor 3.02 cm, diámetro menor 4.81 cm)
- Mazo de hule cuya masa es de 681.0 g.

*Ilustración 4. Set completo del equipo utilizado para la elevación de los cilindros de 5 cm x 10 cm*



(a)



(b)

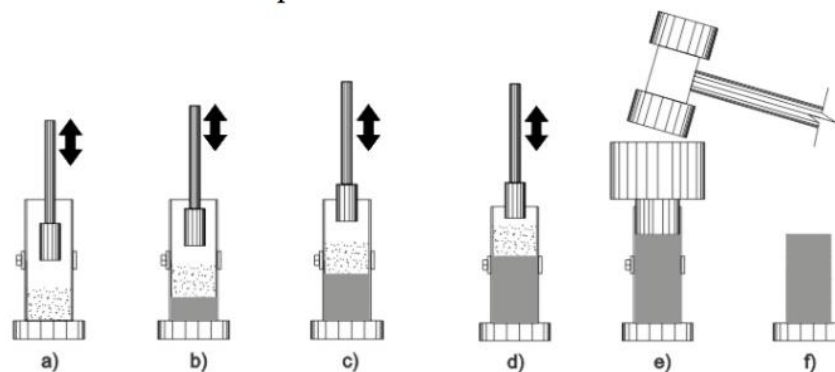
Fuente: mix design methodology for concrete blocks units. 15 International Brick and Block Masonry Conference.

### 2.12.2 Evaluación de cohesión y la textura superficial

A continuación, se explica el método para la elaboración de los especímenes, inicialmente se debe de pesar los materiales con el fin de adquirir la densidad deseada después de la compactación. Seguidamente la masa total de material que va a ser colocada en el molde tri-panel se divide en cuatro partes iguales, de tal manera que el moldeo puede llevarse a cabo con cuatro capas idénticas. La primera capa se coloca en el molde y se golpea veinte veces a manera de compactación, este proceso se realiza con la barra de mortero de compactación, inmediatamente después se coloca la siguiente capa en el molde, y se repite el procedimiento anterior, recibe veinte golpes más, y así sucesivamente hasta completar las cuatro capas.

La energía aplicada con los golpes de la barra de compactación debe ser distribuida por igual entre cada capa, de manera tal que la altura de la muestra sea entre 10.3 cm y 10.5 cm después de los 80 golpes con la barra de compactación. La altura final del espécimen debe de ser de 10 cm y se alcanza después de aplicar unos golpes adicionales al molde con el mazo de hule sobre la cabeza de nylon. Y finalmente, se procede a realizar el desmolde del elemento, desenroscando la prensa que sujeta los tres paneles del molde.

*Ilustración 5. Secuencia de la realización de los especímenes de 5 cm x 10cm*



Fuente: mix design methodology for concrete blocks units. 15 International Brick and Block Masonry Conference.

Donde:

a) Compactación de la primera capa.

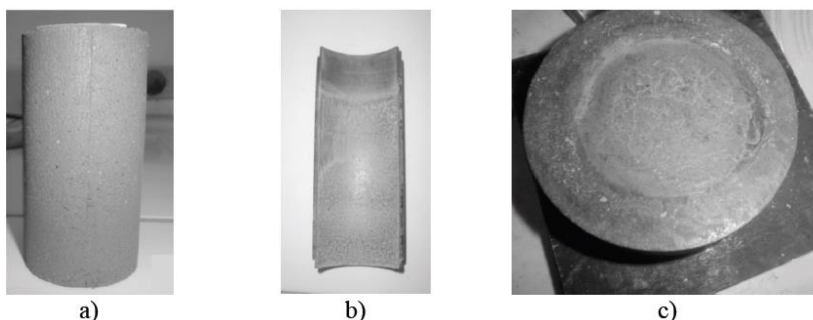
b) Compactación de la segunda capa.

- c) Compactación de la tercera capa.
- d) Compactación de la cuarta capa.
- e) Compactación de los 3 cm restantes con el protector de nylon y el mazo de hule.
- f) Desmoldar el espécimen.

La evaluación superficial del espécimen recientemente moldeado es un excelente predictor de la textura superficial final del producto. Este proceso es llevado a cabo cuando se determina las porciones ideales de los agregados. La textura de las muestras debe ser evaluada visualmente para cada tipo de mezcla, con los contenidos óptimos de agua y para cada una de las densidades estudiadas. (Frasson Jr, Casali, Oliveira , & Prudencio Jr, 2012).

Para la determinación ideal del contenido de agua de un diseño de mezcla para un determinado grado de compactación y de la textura superficial, se debe de valorar la superficie de la muestra inmediatamente después de haber extraído el molde. De igual manera que sucede en medios industriales, cuando el contenido de agua de la mezcla se aproxima al valor óptimo, la superficie del espécimen comenzará a ser ligeramente húmeda. La superficie interna del molde, así como de la base de acero que se utiliza como base durante el modelo también se verán ligeramente humedecidas (Frasson Jr, Casali, Oliveira , & Prudencio Jr, 2012).

*Ilustración 6. Indicación de contenido óptimo de humedad para la mezcla*



Fuente: mix design methodology for concrete blocks units. 15 International Brick and Block Masonry Conference.

Donde:

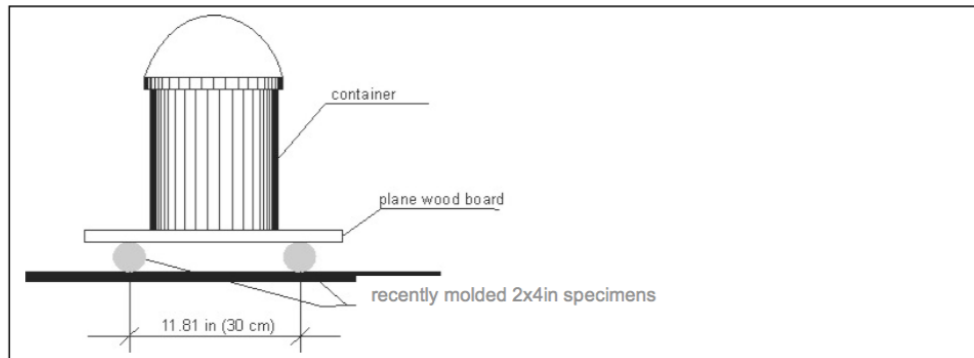
- a) Muestras recientemente retiradas de los moldes y que presentan ligeras huellas de humedad.
- b) Superficie del molde ligeramente húmeda por la pasta de cemento.
- c) Base de molde ligeramente húmeda por la pasta de cemento.

Las mezclas con contenido de humedad por debajo de este punto requerirán más energía de compactación, lo que significará pérdidas de productividad y más desgaste en la maquinaria de vibro-compactación. Los valores por encima de este punto pueden hacer más difícil o incluso imposible producir elementos de mampostería de concreto, ya que pueden presentar problemas relacionados con la deformación de los elementos durante la retirada del molde, así como la adherencia al propio molde.

La cohesión de la mezcla fresca se puede determinar mediante la compresión de las muestras recientemente moldeadas a lo largo de su diámetro (las muestras deben tener un contenido de humedad óptimo y textura).

El procedimiento es el siguiente, dos muestras se colocan sobre una superficie horizontal, en paralelo entre sí, con una distancia de 30 cm entre el mismo eje de cada elemento. Seguidamente se coloca en la parte superior de los especímenes una tabla de madera plana de 50 cm x 20 cm y con un espesor mínimo de 1.5 cm, con el fin de transmitir la carga sobre los especímenes. Posteriormente se coloca un recipiente en la parte superior de la tabla y se llena con agua suficiente para ejercer una carga uniforme de 1 kg/s en las muestras. La prueba tiene como objetivo determinar la carga que es necesaria para deformar los especímenes. Para garantizar la cohesión adecuada de los cilindros, se recomienda que las muestras resistan una carga aproximada de 5 kg a 8 kg. Dicho valor mínimo depende del proceso de producción, y sobre todo en la parte del proceso relacionado con el transporte de los bloques frescos (por ejemplo, el transporte manual vs. uso de un sistema de paletas transportador) (Frasson Jr, Metodología de dosagem para blocos de concreto, 2000).

*Ilustración 7. Determinación de la cohesión de la mezcla fresca*



Fuente: mix design methodology for concrete blocks units. 15 International Brick and Block Masonry Conference.

### **2.12.3 Preparación de la mezcla para diseñar la curva de diseño de la mezcla**

Para realizar la determinación del valor de la densidad que se debe de usar en el estudio del diseño de mezcla depende del equipo y ajustes empleados en el equipo de vibro-compresión que se utilice. Debido a la complejidad del estudio previo para determinar la densidad de la mezcla a utilizar, se sugiere utilizar un rango de valores de densidades que abarcan los obtenidos normalmente en entornos industriales los cuales van de  $1.95 \text{ kg/dm}^3$  a  $2.25 \text{ kg/dm}^3$  ( $1950 \text{ kg/m}^3$  a  $2250 \text{ kg/m}^3$ ) para estudios de laboratorio.

Para la verificación de la cantidad de cemento en la mezcla desarrollada se sugieren las siguientes relaciones de cemento-agregado, (1:7, 1:9, 1:11) la cuales son comúnmente utilizadas en la fabricación de elementos de mampostería estructural con resistencias que oscilan entre los  $4.5 \text{ MPa}$  a  $12 \text{ MPa}$  o ( $45.9 \text{ kg/cm}^2$  a  $122.4 \text{ kg/cm}^2$ ). Posteriormente, se deben realizar al menos cuatro especímenes de concreto de (5 cm x 10 cm) para evaluar la resistencia a la compresión después de veintiocho días.

Si la realización de este estudio de diseño de mezcla va a ser elaborado a nivel de laboratorio, el método de curado empleado debe ser realizado en una caja de espuma de poliestireno, a la cual se debe adicionar en la parte inferior de la misma una lámina de agua.

Sin embargo, si el diseño se pretende llevar a cabo en la planta de los bloques de concreto, el proceso de curado de los especímenes cilíndricos debe ser igual al que utiliza la planta.

#### 2.12.4 Evaluación de la fuerza a la compresión media como función de la fuerza a la compresión especificada

Para la determinación de la resistencia promedio a la compresión como función de la fuerza a la compresión especificada se da la siguiente ecuación.

$$F_{bm} = \frac{F_{bk}}{(1 - 1.65 CV)} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

$F_{bm}$  = Resistencia a la compresión promedio de los bloques de concreto (considerando el área bruta) a una edad dada.

$F_{bk}$  = Resistencia a la compresión especificada a una edad dada.

$CV$  = Coeficiente de variación.

En caso de que los valores del coeficiente de variación no estén disponibles en la planta que se está realizando el estudio, dichos valores del coeficiente de variación son sugeridos en la tabla x, los cuales varían con el tipo de dosificación, el equipo disponible, el proceso de control de producción y con la experiencia del personal de producción.

*Tabla 7. Tabla de coeficientes de variación para los valores de resistencia a la compresión*

Tipo de Control/Equipo	Valores de coeficiente de variación (%)		
	Bueno	Regular	Pobre
1 - Control del proceso y experiencia del personal	5	15	25
2 - Equipo: Vibro-compresión y sensores de humedad	5	15	25
3 - Lote por volumen	5	10	15
4 - Lote por masa	10	15	20

Fuente: A mix design methodology for concrete blocks units. 15 International Brick and Block Masonry Conference.



### 2.12.5 Determinación de la relación cemento-agregado

Con los datos de resistencia a la compresión que arrojan los especímenes cilíndricos de (5 cm x 10 cm), se traza una curva de resistencia a la compresión versus densidad.

Obteniendo primeramente la densidad de los bloques de concreto producidos con el equipo de vibro-compactación utilizada para la producción real, y con las curvas de resistencia a la compresión versus densidad, se puede predecir la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de (5 cm x 10 cm). Así mismo mediante la siguiente ecuación y la resistencia a la compresión de los especímenes de (5 cm x 10 cm) se puede predecir la resistencia a la compresión de los bloques de concreto ( $F_{bm}$ ).

$$F_{bm} = \frac{f_s}{0.8^*} \times \frac{A_{neta}}{A_{bruta}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

$f_s$  = Resistencia a la compresión promedio de los especímenes de (5cm x 10cm)

$A_{neta}$  = Área neta de los bloques de concreto

$A_{bruta}$  = Área bruta de los bloques de concreto.

\* = Para los bloques de (12 cm x 20 cm x 40 cm) el coeficiente de los especímenes contra bloque con esas dimensiones es 0.8 (Frasson Jr, Metodología de dosagem para blocos de concreto, 2000).

Nota: la realización de los ensayos de resistencia a la compresión de los elementos tanto de mampostería estructural como de los especímenes cilíndricos se llevarán a cabo como lo establece la norma INTE C39 la cual hace referencia a la norma ASTM C39 y la INTE C50 en su apartado 7 y anexo A1.3 la cual hace referencia a la norma ASTM C140, según corresponda para cada uno de los ensayos mencionados anteriormente.

### **2.13 Marco situacional**

El presente proyecto se llevará a cabo en la empresa Productos de Concreto (PC), la cual cuenta con un gran historial en la industria del concreto prefabricado, así mismo tiene una amplia experiencia en el desarrollo tecnológico del concreto, dicha empresa está ubicada en San Rafael de Alajuela.

### **2.14 Productos de Concreto**

Productos de Concreto es una empresa de capital cien por ciento costarricense, la cual cuenta con un gran recorrido en la actividad del concreto prefabricado ya que tiene casi 70 años en la industria de la construcción, el amplio recorrido con el que cuenta Productos de Concreto ha hecho de ella una industria vanguardista, ya que se ve exigida a operar bajo estándares de calidad reconocidos internacionalmente.

Se especializa en la investigación, diseño y desarrollo de soluciones constructivas de concreto prefabricado con altos niveles de ingeniería, innovación y calidad; desde el bloque de pared hasta grandes estructuras prefabricadas para industria, comercio, uso residencial e infraestructura vial como puentes, muelles, entre otros.

Productos de Concreto es una empresa líder en el mercado, así lo respalda el trabajo que realiza desde 1948, desarrollando grandes obras que permanecen, tanto para la empresa pública como la privada.

#### **2.14.1 Visión**

Mejorar la eficiencia, la calidad y la durabilidad de los proyectos de construcción y del desarrollo de infraestructura, por medio de la innovación constante y soluciones constructivas integrales en materiales, diseños, procesos y servicios de ingeniería para cada uno de nuestros clientes.

#### **2.14.2 Ubicación**

Productos de Concreto cuenta con ocho plantas en todo el territorio nacional las cuales se encuentran ubicadas en: San Rafael de Alajuela, Javillos San Carlos, Ochomogo Cartago, Guápiles y Chirripó. La planta principal es la que se encuentra ubicada en San Rafael de Alajuela. Dentro de este complejo alberga tres plantas, una de prefabricado liviano, otra de

producción de mampostería y la planta de prefabricado pesado, donde se llevan a cabo proyectos especiales.

*Ilustración 8. Ubicación de plantas de productos de concreto*



Fuente: [www.productosdeconcretocr.com](http://www.productosdeconcretocr.com)

## **CAPÍTULO 3. Marco metodológico**

Durante el avance de la investigación se adoptará la metodología de investigación en relación con el método científico, de manera que se pueda alcanzar en gran parte lo planteado en los objetivos. Para la ejecución de este apartado se tomará como referencia los procedimientos de ensayos correspondientes propuestos por el brasileño Frasson Jr en la metodología propuesta en su tesis de investigación, para la elaboración y ensayos de los especímenes cilíndricos, también se tomarán como referencia los procedimientos y ensayos correspondientes de las normas ASTM (American Society for Testing and Materials por sus siglas en inglés), o en su efecto las adaptaciones de estas normas al país, realizadas por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) en sus versiones más recientes, para los procedimientos en la determinación de la resistencia del concreto ante esfuerzos de compresión, absorción, densidad, área neta promedio, área bruta y resistencia a la compresión de los bloques de concreto, así como la caracterización granulométrica de los agregados utilizados.

### **3.1 Enfoque metodológico y métodos de la investigación propuesta**

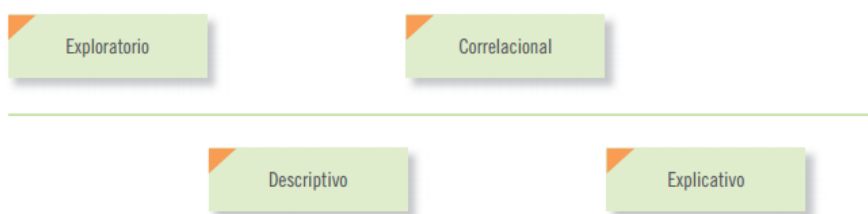
Las investigaciones en el área de la ingeniería generalmente son de tipo cuantitativas, y se pueden clasificar según el alcance de dicha investigación como lo afirmado a continuación.

Según lo indica (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010), se diferencian tres tipos de enfoques para la investigación, los cuales se denominan: cuantitativo, cualitativo y mixto. El presente proyecto de investigación se toma como un enfoque cuantitativo, ya que el procedimiento a realizar está basado en pruebas y ensayos de laboratorio, con el fin de justificar el comportamiento de las propiedades mecánicas del concreto desarrollado con poliestireno expandido para la fabricación de elementos de mampostería. El enfoque cuantitativo es secuencial y probatorio y se define como “usar la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías” (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010, pág. 4).

### 3.2 Categorías de análisis de la investigación

En cuanto a las categorías y los alcances de la investigación cuantitativa (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010), mencionan cuatro tipos, los cuales se presentarán en la siguiente ilustración. Para efectos de esta investigación se tomará únicamente la categoría del alcance tipo exploratorio.

*Ilustración 9. Alcances que puede tener un estudio cuantitativo*



Fuente: (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010, pág. 78).

#### 3.2.1 Alcance de tipo exploratorio

En este tipo de alcance se “examina un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes. Es decir, cuando la revisión de la literatura reveló que tan sólo hay guías no investigadas e ideas vagamente relacionadas con el problema de estudio, o bien, si deseamos indagar sobre temas y áreas desde nuevas perspectivas” (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010, pág. 79).

#### 3.2.2 Alcance de la investigación

Dicha investigación parte de una serie de procedimientos en los cuales se deben realizar diferentes diseños de mezcla con su respectivo desarrollo teórico, numérico y experimental, seguido de la elaboración de especímenes cilíndricos, aplicación de ensayos de laboratorio y extracción de los resultados obtenidos. Con base en dicha información, se determina que la presente investigación seguirá un enfoque cuantitativo y con un alcance de tipo exploratorio, ya que tiene como objetivos la realización de diseños de mezcla de concreto hasta obtener una densidad aproximada de  $1800 \text{ kg/m}^3$ , utilizando como agregado no convencional poliestireno expandido (EPS), con el fin de obtener una mezcla liviana para la fabricación de elementos de

mampostería. Cabe destacar que esta investigación también se puede tomar como un alcance de tipo experimental, debido a que con los resultados esperados se puedan exponer los resultados obtenidos en el laboratorio, los cuales son de suma importancia porque explican las propiedades mecánicas del concreto desarrollado.

### **3.3 Sujetos y métodos de información**

Los sujetos presentes en esta investigación son: Productos de Concreto S.A y la Universidad Latina de Costa Rica. La información se recauda por medio de libros, proyectos de tesis, normas técnicas establecidas por ASTM e INTECO, revistas científicas y páginas de internet.

#### **3.3.1 Recopilación de información**

Se recopilará la información necesaria de fuentes primarias para la elaboración de este proyecto, principalmente se tomará la tesis desarrollada por Artemio Frasso Jr, en el año 2000, así como su artículo publicado en la revista International Brick and Block Masonry Conference en el año 2012, sin dejar de lado la consulta en algunos libros de interés relacionados con el tema que se está desarrollando.

Este proyecto de investigación se realizará con base en los parámetros establecidos para los métodos de ensayos y muestreos propuestos por las normativas correspondientes con respecto a la producción de mezclas secas de concreto, para la elaboración de elementos de mampostería en Costa Rica. Dichos parámetros son establecidos por la norma ASTM, o bien sea por la entidad reguladora INTECO, la cual es la encargada de la adaptación de las normas ASTM en Costa Rica, por lo que a su vez deberá de cumplir una serie de estándares establecidos por el ACI.

Debido a que el presente proyecto de investigación se determinó con un alcance de tipo exploratorio, este se va a llevar a cabo en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de la empresa Productos de Concreto S.A, la cual tiene gran recorrido y una amplia experiencia en el desarrollo tecnológico de mezcla de concreto, por lo que la información que se recopile en dicho laboratorio se tomará como información secundaria.

### 3.4 Definición de variables

Se denomina variable a “una propiedad que puede fluctuar y cuya variación es susceptible de medirse u observarse” (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010, pág. 93).

En el siguiente cuadro se muestran las variables según los objetivos de dicho proyecto de investigación.

*Tabla 8. Definición de variables*

<b>Objetivos específicos</b>	<b>VARIABLES por medir</b>	<b>Instrumentos por utilizar</b>	<b>Resultados esperados</b>
Evaluar las características y propiedades mecánicas del poliestireno expandido (EPS).	Aporte al diseño de mezcla de concreto según sus propiedades.	Investigación de documentos	Buena adaptación y aporte a la mezcla que se desarrollara.
Obtener un diseño de mezcla con una densidad aproximada los 1800 kg/m <sup>3</sup> mediante la adición de poliestireno expandido (EPS).	Porcentaje de poliestireno expandido por utilizar para alcanzar la densidad deseada del concreto.	Balanza. Recipiente tipo cubeta o similar. Moldes cilíndricos tipo Frasson Jr. Ensayos a la compresión.	Obtener un diseño de mezcla de concreto con la densidad esperada de la presente investigación.
Determinar el diseño de mezcla óptimo mediante la variación de porcentajes de cemento.	Porcentaje de cemento adicionado a cada una de las mezclas.	Batidora. Cubetas. Moldes cilíndricos tipo Frasson Jr. Ensayos a la compresión.	Obtener un diseño de mezcla liviana ideal que cumpla con los estándares de calidad para la producción de bloques de concreto.
Elaborar todo el	Porcentajes de	Ensayos a la compresión y	Demostrar teórica y

proceso teórico y experimental para los diseños de mezcla.	agregados. Cantidad de cemento. Cantidad de agua. Cantidad EPS. Compactación.	muestreo según normativa vigente. Cemento conforme a la norma RTCR 479:2015. Agregados conforme a la especificación INTE C15	experimentalmente el diseño de mezcla optimo
Demostrar experimentalmente la composición de la resistencia a la compresión de los especímenes.	Compactación. Cantidad de humedades y cemento en las mezclas. Dosificación de los agregados.	Ensayos a la compresión de los especímenes según la norma estipulada para este ensayo ASTM C39	Determinar experimentalmente la influencia del EPS en los diseños de mezclas desarrollados.

Fuente: Elaboración propia, 2017

### 3.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, se realizará una exhaustiva búsqueda de las normas que rigen los procesos que se emplean para llevar a cabo la investigación, debido a que la mayoría de estos procesos se realizan bajo los parámetros establecidos de cada una de las normas a utilizar. En caso de que alguno de los procedimientos por realizar no se encuentre supervisado bajo una normativa se deberá adoptar y documentar una metodología, en la cual siempre se seguirá el mismo procedimiento establecido.

#### 3.5.1 Investigación de documentos

Esta es una de las técnicas más importantes para la elaboración de una investigación, ya que es aquí donde se recopila toda la sustentación teórica necesaria para llevar a cabo el proyecto, en este proceso se procura conocer el manejo del tema, los supuestos e inciertos



relacionados con el tema. Se elaborará una guía sobre todos los temas mencionados, pues será referencia específica en la elaboración del marco teórico y la bibliografía.

### **3.5.2 Pruebas de laboratorio**

Las pruebas y ensayos de laboratorio son de suma importancia, ya que sin esta técnica sería imposible realizar la sustentación del presente proyecto de graduación. Los ensayos de laboratorio son los encargados de brindar la información respectiva de los datos de cada una de las pruebas que se deben realizar en esta investigación, con el fin de determinar el comportamiento del concreto al adicionarle EPS como agregado no convencional. Se considera indispensable planificar un control estricto de los parámetros encontrados dentro del análisis de cada prueba, para obtener resultados exactos y similares a la práctica de la realización de las mezclas de concreto en campo sin alterar mucho su entorno.

#### **3.5.2.1 Equipo utilizado**

A continuación, se presentará el equipo utilizado en el desarrollo de la presente investigación.

- Bandejas:

*Ilustración 10. Bandejas según especificaciones INTE C71*



Fuente: Elaboración propia, 2017

- Balanzas:

*Ilustración 11. Balanza de precisión de 0.1% de la masa de ensayo*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 12. Balanza para determinar densidades de sólidos*



Fuente: Elaboración propia, 2017

- Horno

*Ilustración 13. Horno ventilado capaz de mantener una temperatura de  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$*



Fuente: Elaboración propia, 2017

- Prensa hidráulica

*Ilustración 14. Prensa hidráulica automática de ensayo a compresión*



Fuente: Elaboración propia, 2017

- Batidora

*Ilustración 15. Batidora estacionaria*



Fuente: Elaboración propia, 2017

- Set completo para elaborar los especímenes propuestos por Frasson Jr

*Ilustración 16. Equipo propuesto por Frasson Jr*



Fuente: Elaboración propia, 2017

### **3.5.3 Fotografías**

Esta técnica se implementará con el propósito de documentar de manera ilustrativa los procedimientos que se pretenden llevar a cabo en cada uno de los procesos y ensayos de laboratorio elaborados por el responsable de realizar dicha investigación. Cabe destacar que el material ilustrativo es de gran ayuda para el lector, ya que de esta manera se da una idea más clara de cada uno de los procedimientos ejecutados durante los procedimientos.

### **3.5.4 Recolección y procesamiento de datos**

Para la recolección, procesamiento y análisis de los datos obtenidos en cada una de las pruebas realizadas se va a utilizar una herramienta de Microsoft, específicamente Excel, con la cual se van a realizar tablas y gráficas para la comparación y análisis de los resultados obtenidos.

## **3.6 Presupuesto**

En el presente proyecto de investigación se cuenta con el apoyo de la empresa Productos de Concreto, por lo que dicha investigación se realizará en las instalaciones de PC, la cual tendrá total disposición del estudiante, y su vez le brindará tanto las herramientas necesarias como los materiales requeridos para el desarrollo del proyecto de graduación. Sin embargo, dicha empresa solicitó una estimación de los materiales que se van a disponer para la realización del presente proyecto de graduación.

A continuación, se presenta la estimación de los materiales que se van a utilizar para el desarrollo de esta investigación.

*Tabla 9. Cantidad de materiales utilizados en el desarrollo del proyecto*

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>
Cemento	30 kg
Poliestireno expandido	10 kg
Piedra de 12 mm Cerro minas	80 kg
Arena industrial Cerro minas	75 kg
Arena industrial Guápiles	182 kg
Aditivo Eco sol	38 mL
Agua	11 L
Desmoldante	2 L
Mazo, cabeza de acero cubierta de hule	2

Fuente: Elaboración propia, 2017

### **3.7 Procedimiento para la ejecución experimental de la investigación**

- Como primera fase de la investigación a desarrollar, se debe realizar toda la caracterización correspondiente explicada anteriormente en el marco teórico, (apartado 2.11.1 Cálculos para unidades de mampostería según norma INTE C50). Paralelo a estos ensayos se debe realizar la calibración del método de Frasson Jr siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, (Apartado 2.12 Método de diseño de mezclas de concreto para mampostería estructural propuesto por Frasson Jr).
- Determinar las propiedades físicas del poliestireno expandido que se va a utilizar en la elaboración de la presente investigación, densidad real y densidad aparente de las partículas esféricas.
- Incorporar las partículas de EPS de manera experimental al diseño de mezcla actual utilizado por Productos de Concreto para la fabricación

de mampostería, hasta alcanzar una densidad aproximada del concreto de 1800 kg/m<sup>3</sup>.

- Realizar el procedimiento descrito en el (apartado 2.12.1 Método de Frasson Jr) con el fin de realizar los especímenes planteados por Frasson y evaluar la resistencia a esfuerzos de compresión del diseño de mezcla propuesto.
- Determinar el diseño de mezcla óptimo mediante una serie de variaciones, aumentar el contenido de cemento en la mezcla en un 10%, 20% y 30% con respecto a la cantidad utilizada actualmente, cambiar el tipo de cemento utilizado actualmente (MP) por UG-AR y al igual que lo mencionado anteriormente incrementar su contenido en un 10%, 20% y 30%, posteriormente se deben tomar los mejores resultados al comparar los datos arrojados por los ensayos correspondientes de las diferentes dosificaciones mencionadas anteriormente, y se le adiciona un aditivo acelerante de resistencias iniciales.
- Evaluar todos los diseños de mezcla realizados con incorporación de EPS, tomar el que dio los mejores resultados y realizar un último set de especímenes según lo indicado en el apartado 2.12.1 método de Frasson Jr.

Para la realización de los ensayos se trabajará en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de la empresa costarricense Productos de Concreto S.A.

### **3.8 Procedimiento de pruebas experimentales para los bloques**

#### **3.8.1 Muestreo y método de ensayo en mampostería**

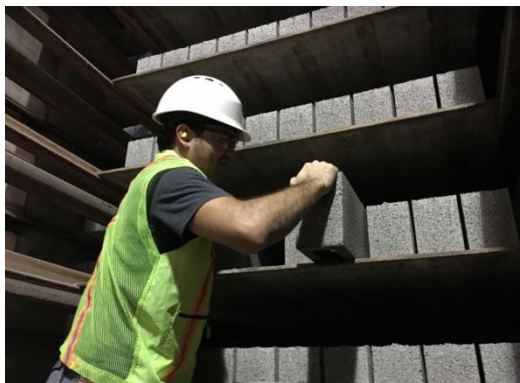
Durante la elaboración de este procedimiento se tomó como referencia la norma INTECO C50, donde se especifican los procedimientos y la forma correcta para realizar el muestreo y ensayos correspondientes a las unidades de mampostería.

### 3.8.1.1 Muestro de las unidades de mampostería

El muestreo se realizó según lo indica la norma INTE C50. Las unidades de mampostería seleccionadas se extrajeron directamente de la cámara de curado en la planta denominada MASA. Cabe resaltar que las muestras seleccionadas se tomaron de la parte exterior de dichas cámaras, las cuales no cuentan con compuertas totalmente herméticas, por lo tanto, los bloques seccionados permanecieron durante las primeras veinticuatro horas expuestos a cambios de temperatura y eventualmente a irregularidades en el ambiente, lo que puede incurrir en la afectación de los mismos con respecto a sus propiedades mecánicas, ya que no recibieron un adecuado curado inicial.

Se extrajo un total de veintinueve elementos, los cuales se dividieron de la siguiente forma: seis unidades para el ensayo de resistencia a la compresión a veinticuatro horas, a siete días y a veintiocho días, para un total de dieciocho elementos para fallar, seis unidades para la medición de las dimensiones y cinco unidades para absorción y densidad. A continuación, se presenta una imagen ilustrativa del proceso de muestreo en la cámara de curado inicial de Productos de Concreto.

*Ilustración 17. Muestreo de elementos de mampostería*



Fuente: Elaboración propia, 2017

Los muestreos de los elementos se realizaron a las veinticuatro horas posterior a su fabricación, seguidamente se llevaron hasta las instalaciones del laboratorio de la masa, donde se pusieron a curar con el método propuesto por Frasson Jr, el cual consiste en una simulación

de cámara húmeda, utilizando una caja de poliestireno y colocando una lámina de agua en la parte inferior de la misma.

*Ilustración 18. Transporte de los elementos de mampostería*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 19. Método de curado propuesto*



Fuente: Elaboración propia, 2017

### **3.8.1.2 Ensayos de las unidades de mampostería**

El desarrollo de este inciso consiste en realizar todos los ensayos respectivos para los elementos de mampostería según lo indica la norma, la ejecución de estos ensayos se explica en el capítulo 2 (sección 2.11 muestreo y métodos de ensayo de unidades de mampostería de concreto según norma INTE C50).

#### **Ensayos de resistencia a compresión**

Para la ejecución de los ensayos de resistencia a esfuerzos de compresión se tomaron dieciocho unidades de mampostería, las cuales se dividieron en seis unidades por ensayo,



respetando los respectivos días de curado (24 horas, 7 días y 28 días). Previo al ensayo de resistencia a la compresión de los elementos de mampostería, se debió realizar a cada una de las unidades el procedimiento de coronamiento según lo indica la norma INTE C53 24 horas antes del ensayo a compresión.

*Ilustración 20. Coronación del bloque*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 21. Prensa hidráulica para ensayar bloques a compresión*



Fuente: Elaboración propia, 2017

## Medidas dimensionales de los elementos

Las mediciones de los especímenes se realizaron según lo indica el anexo correspondiente de la norma INTE C50 la cual sugiere que se deben de medir las dimensiones totales del elemento, (ancho, altura, longitud) por lo menos en dos ubicaciones opuestas del espécimen.

*Ilustración 22. Dimensiones de la longitud del bloque*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 23. Dimensiones de la altura del bloque*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 24. Dimensiones del ancho del bloque*



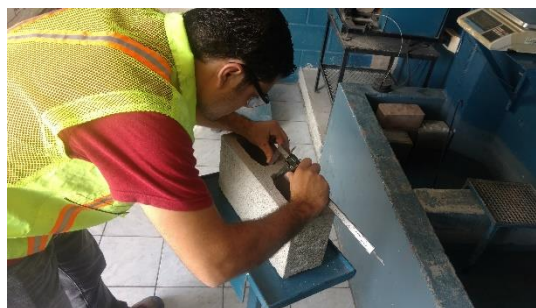
Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 25. Dimensiones del espesor de las paredes externas del bloque*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 26. Dimensiones del espesor de las paredes internas del bloque*



Fuente: Elaboración propia, 2017

### **Ensayo de absorción, humedad**

Para realizar estos ensayos se dejan saturando los elementos por un tiempo de veinticuatro horas, posteriormente a la saturación se les tomó el peso saturado, el peso saturado en superficie seca y el peso seco al horno, para obtener el peso al horno los especímenes se deben dejar secando al horno por un tiempo de veinticuatro horas a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C.

*Ilustración 27. Saturación de bloques*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 28. Peso saturado del bloque*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 29. Secado del bloque para tomar el peso saturado superficie seca*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 30. Peso saturado superficie seca*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 31. Secado al horno de los bloques*



Fuente: Elaboración propia, 2017

## **CAPÍTULO 4. Resultados y análisis de los resultados**

El presente capítulo se divide en dos secciones, donde se llevará a cabo todo el procesamiento y análisis de datos obtenidos durante el desarrollo de los ensayos de laboratorio realizados en esta investigación.

En la primera parte se presentará la tabulación y recopilación de los resultados obtenidos con base en los ensayos realizados de los elementos de mampostería según lo indicado en el marco teórico, (sección 2.11 Muestreo y métodos de ensayo de unidades de mampostería de concreto según norma INTE C50). Seguidamente se realizará la estimación de  $F_{bk}$  para la obtención del  $f_s$  de los cilindros (refiérase a la sección 2.12.4 y 2.12.5 de este proyecto).

Posteriormente se dispondrá de la validación de la mezcla seca de concreto liviano mediante la incorporación de EPS como agregado no convencional. Este procedimiento se utilizará la metodología propuesta por Frasson Jr, explicada en el capítulo 2 de la presente investigación, (sección 2.12 Método de diseño de mezclas de concreto para mampostería estructural propuesto por Frasson Jr).

En la segunda parte de este capítulo, se expondrá la discusión y análisis de los resultados tabulados en la primera parte. De esta manera se podrá analizar el comportamiento de las diferentes mezclas secas de concreto liviano propuestas para la fabricación de elementos de mampostería estructural. Por otra parte, se va a elaborar una curva que relacione la resistencia a la compresión de los bloques fabricados por Productos de Concreto, en comparación con las resistencias obtenidas a veinticuatro horas de los especímenes de 5 cm x 10 cm que contienen EPS.

### **4.1 Tabulación de datos de muestreo y ensayos de unidades de mampostería según norma INTE C50**

#### **4.1.1 Medición de las dimensiones según la norma INTE C50**

En la siguiente información se encuentra la tabla 10, la cual contiene los datos de las dimensiones de los bloques muestreados, las dimensiones de los elementos de mampostería se

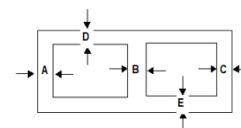


tomaron siguiendo el procedimiento establecido en la norma INTE C50, anexo A (sección

*Tabla 10. Dimensiones de los bloques muestreados según INTE C50*

A1.2)

Dimensiones de unidades de mampostería de concreto según INTE C50									
Fecha de producción		29/6/2017		Fecha de mediciones		27/7/2017			
# de muestra	Altura (cm)	Ancho (cm)	Largo (cm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	Peso del bloque W (kg)
13	19,2	12,0	39,0	25,65	27,46	25,44	25,64	25,48	10,50
14	19,2	11,9	39,0	25,78	26,95	25,21	25,94	26,63	12,10
15	19,1	11,9	39,0	26,58	26,78	26,90	26,07	26,81	11,60
16	19,2	11,9	39,0	26,50	26,90	26,44	26,80	25,99	11,70
17	19,0	12,0	39,0	26,09	27,28	25,44	25,82	26,35	11,90
18	19,0	12,0	39,1	26,55	27,01	26,77	26,05	26,96	11,80
<b>Promedio</b>	<b>19,12</b>	<b>11,95</b>	<b>39,02</b>	<b>26,19</b>	<b>27,06</b>	<b>26,03</b>	<b>26,05</b>	<b>26,37</b>	<b>11,60</b>



Fuente: Elaboración propia, 2017

Como se puede observar en la matriz de datos de la tabla 10 los valores de las dimensiones son muy uniformes, lo que permite predecir que las producciones de los elementos de mampostería son muy regulares.

A continuación, en la tabla 11 se aprecia mejor la diferencia que hay entre los valores máximos y valores mínimos de la matriz de dimensiones de los bloques de concreto muestreados.

*Tabla 11. Diferencia de peso dimensiones en los bloques de concreto*

Diferencia entre la máxima y mínima dimensión de los elementos seleccionados									
	Altura (cm)	Ancho (cm)	Largo (cm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	Peso del bloque W (kg)
<b>Máximo</b>	19,20	12,00	39,10	26,58	27,46	26,90	26,80	26,96	12,10
<b>Mínimo</b>	19,00	11,90	39,00	25,65	26,78	25,21	25,64	25,48	10,50
<b>Δ</b>	<b>0,20</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>0,93</b>	<b>0,68</b>	<b>1,69</b>	<b>1,16</b>	<b>1,48</b>	<b>1,60</b>

Fuente: Elaboración propia, 2017



*Ilustración 32. Medición de dimensiones según INTE C50*



Fuente: Elaboración propia, 2017

**4.1.2 Tabulación de datos y cálculos según la norma INTE C50**

La siguiente tabla contiene los cálculos requeridos en los bloques muestreados según lo indicado en la norma, adicional a la tabla y con el fin de ejemplificar los cálculos realizados a estos elementos, se presenta una memoria de cálculo para un bloque dado.

*Tabla 12. Características y cálculos de los bloques de concreto según INTE C50*

Cálculos de elementos de mampostería según INTE C50													
Tipo de Bloque (cm)	Bloque #	Peso inicial $W_i$ (kg)	Peso sss $W_s$ (kg)	Peso sumer. $W_i$ (kg)	Peso seco $W_e$ (kg)	Absorción $\text{kg/m}^3$	% Absorción	% absorción total	Densidad $\text{kg/m}^3$	Volumen Neto $V_n$ ( $\text{cm}^3$ )	Área Neta Promedio $A_n$ ( $\text{mm}^2$ )	Área Neta $A_n$ ( $\text{mm}^2$ )	Área Bruta $A_g$ ( $\text{mm}^2$ )
12x20x40	D1	12,02	12,22	6,89	11,29	175	8,27 %	78,3 %	2117	5330	28052,63	46624,9	46800,00
12x20x40	D2	11,64	11,93	6,69	10,91	194	9,30 %	71,9 %	2082	5240	27578,95	46624,9	46800,00
12x20x40	D3	11,57	11,97	6,72	11,00	185	8,83 %	59,0 %	2095	5247	27615,79	46624,9	46800,00
12x20x41	D4	11,77	12,00	6,75	11,05	182	8,65 %	75,7 %	2103	5252	27642,11	46624,9	46800,00
12x20x40	D5	12,03	12,23	6,91	11,25	185	8,74 %	79,0 %	2112	5326	28031,58	46624,9	46800,00
Promedio =		11,80	12,07	6,79	11,10	184,08	8,76	72,81	2102,17	5279,00	27784,21	46624,92	46800,00

Fuente: Elaboración propia, 2017

**4.1.2.1 Memoria de cálculo del bloque D1 según INTE C50**

A continuación, se presenta la memoria mencionada la cual se explica en el capítulo 2 (sección 2.11.2 Cálculos para unidades de mampostería según norma INTE C50), para uno de los bloques, con el fin de entender mejor los cálculos presentados en la tabla 12.

Nota: todas las ecuaciones planteadas están descritas en la sección 2.11.2, para más información se referirse a esa sección con el número de ecuación escrita en la parte inferior de la misma.

**Absorción:**

$$\text{Absorción, } \frac{kg}{m^3} = \left[ \frac{(W_s - W_d)}{(W_s - W_i)} \right] x 1000 = \left[ \frac{(12.22 - 11.29)}{(12.22 - 6.89)} \right] x 1000 = 175 \frac{kg}{m^3}$$

(ecuación 2)

$$\text{Absorción, \%} = \left[ \frac{(W_s - W_d)}{(W_d)} \right] x 100 = \left[ \frac{(12.22 - 11.29)}{(11.29)} \right] x 100 = 8.27\%$$

(ecuación 3)

**Contenido de humedad:**

$$\text{Absorción total, \%} = \left[ \frac{(W_r - W_d)}{(W_s - W_d)} \right] x 100 = \left[ \frac{(12.02 - 11.29)}{(12.22 - 11.29)} \right] x 100 = 78.3\%$$

(ecuación 4)

**Densidad:**

$$\text{Densidad (D), } \frac{kg}{m^3} = \left[ \frac{W_d}{(W_s - W_i)} \right] x 1000 = \left[ \frac{11.29}{(12.22 - 6.89)} \right] x 1000 = 2117 \frac{kg}{m^3}$$

(ecuación 5)

**Área neta promedio:**

$$\text{Volumen Neto (V}_n\text{), } cm^3 = (W_s - W_i) x 10^3 = (12.22 - 6.89) x 10^3 = 5330 cm^3$$

(ecuación 6)

$$\text{Área Neta Promedio (A}_n\text{), } mm^2 = \frac{(V_n x 10^3)}{H} = \frac{(5330 x 10^3)}{190} = 28052.63 mm^2$$

(ecuación 7)

### **Área Bruta:**

$$\text{Área Bruta } (A_g), \text{ mm}^2 = L \times W = 390 \times 120 = 46800 \text{ mm}^2$$

(ecuación 8)

#### **4.1.3 Tabulación de datos y cálculos de la resistencia a la compresión sobre el área neta a diferentes edades**

En esta sección, se proporcionará la información requerida para la memoria de cálculo realizada al bloque 1 para el cálculo de las resistencias a la compresión sobre el área neta según lo indica la norma INTE C50, con el fin de ejemplificar de manera cuantitativa los valores tabulados más adelante. En la tabla 13 se encuentran los resultados obtenidos de la resistencia a esfuerzos de compresión sobre el área neta de los elementos de mampostería a diferentes edades, seguida de la gráfica X, la cual representa el incremento de las resistencias a lo largo de tiempo de curado en los elementos de mampostería.

##### **4.1.3.1 Memoria de cálculo del bloque 1 para determinar la resistencia a la compresión sobre el área neta y área bruta**

En esta sección se realizará la memoria de cálculo del bloque 1 para la determinación de la resistencia a esfuerzos de compresión sobre el área neta, los cálculos se harán con respecto a lo indicado en la norma INTE C50

#### **Cálculos:**

Datos iniciales.

$$P_{\max} = 10.7 \text{ tonf} = 10700 \text{ kgf}$$

$$A_n = 28052.63 \text{ mm}^2 = 280.5 \text{ cm}^2$$

$$A_g = 46800 \text{ mm}^2 = 468 \text{ cm}^2$$

$$\text{Resistencia a la compresión sobre el área neta } \left( \frac{kg}{cm^2} \right) = P_{max} / A_n = \frac{10700}{280.5} = 38.14 \frac{kg}{cm^2}$$

(ecuación 9)

$$\text{Resistencia a la compresión sobre el área bruta } \left( \frac{kg}{cm^2} \right) = P_{max} / A_n = \frac{10700}{468} = 22.86$$

$$\frac{kg}{cm^2}$$

(ecuación 10)

Sabiendo que 10.2 kg/cm<sup>2</sup> es igual a 1 MPa, se realiza una conversión para obtener la resistencia a la compresión en MPa como lo indica la norma.

$$\text{Resistencia a la compresión sobre el área neta (MPa)} = \frac{38.14}{10.2} = 3.74 \text{ MPa}$$

(ecuación 9)

$$\text{Resistencia a la compresión sobre el área bruta (MPa)} = \frac{22.86}{10.2} = 2.24 \text{ MPa}$$

(ecuación 10)

Seguidamente se realizará el cálculo promedio de las resistencias a esfuerzos de compresión en los bloques a diferentes edades de curado, 24 horas, 7 días y 28 días.

$$\text{Promedio de resistencia a compresión, } \frac{kg}{cm^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$\text{Promedio resistencia a compresión 24 h} = \frac{39.5+39.9+39.9+34.2+44.6+49.2}{6} = 41.21 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\text{Promedio resistencia a compresión 7 días} = \frac{117.4+73.3+86.9+65.9+80.1+129.1}{6} = 92.13 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Promedio resistencia a compresión 28 días} = \frac{111.9+104.9+92.2+131.8+121.6+135.5}{6} = 116.3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

*Ilustración 33. Prensa hidráulica para ensayo a esfuerzos de compresión en bloque*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 34. Ensayo a la compresión del bloque a 7 días*



Fuente: Elaboración propia, 2017

En la tabla 13 se muestran las resistencias obtenidas en cada uno de los elementos ensayados con su respectivo tiempo de curado, los cálculos se realizaron como se explicó en la sección anterior.

Tabla 13. Resistencia a la compresión a diferentes edades

Ensayo a 24 hrs		Fecha 30/6/2017	
Block	Tiempo de cura (Días)	Resist. Compr. (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga máx. (tonF)
1	1	39,5	10,7
2	1	39,9	10,8
3	1	39,9	10,8
4	1	34,2	9,2
5	1	44,6	12,1
6	1	49,2	13,3
Promedio =		41,21	11,13

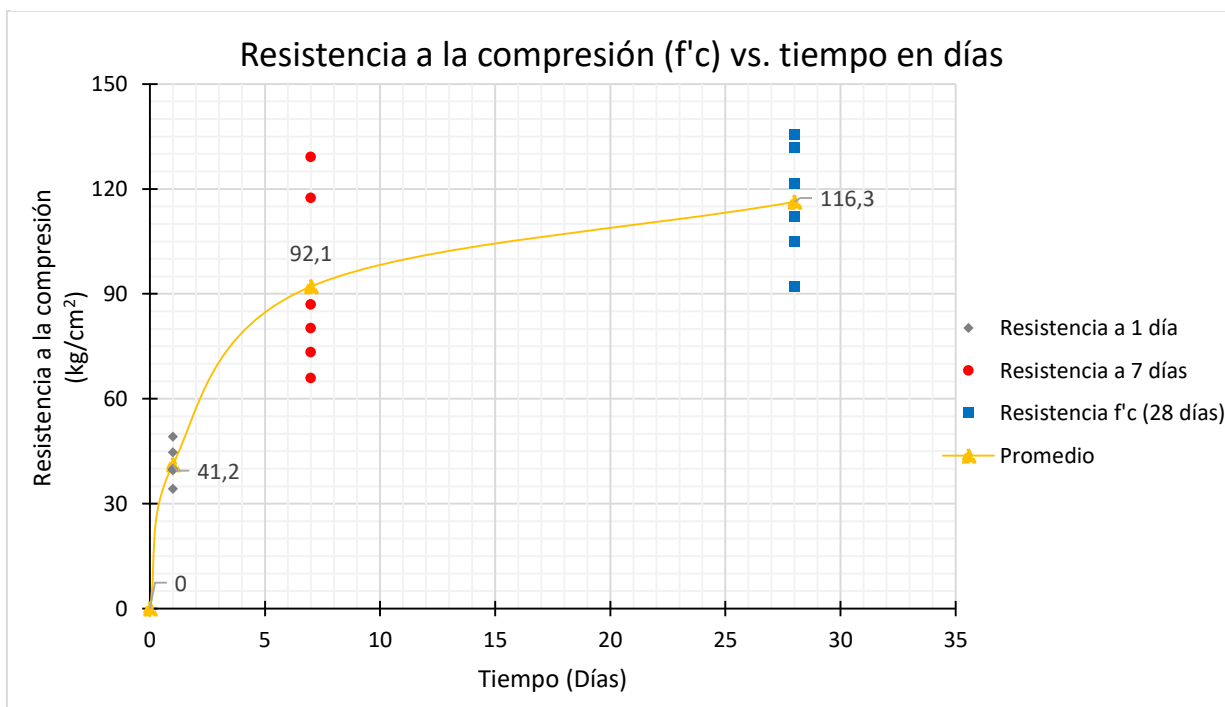
Ensayo a 7 días		Fecha 6/7/2017	
Block	Tiempo de cura (Días)	Resist. Compr. (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga máx. (tonF)
7	7	117,4	31,7
8	7	73,3	19,8
9	7	86,9	23,5
10	7	65,9	17,8
11	7	80,1	21,6
12	7	129,1	34,9
Promedio =		92,13	24,87

Ensayo a 28 días		Fecha 27/7/2017	
Block	Tiempo de cura (Días)	Resist. Compr. (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga máx. (tonF)
13	28	111,9	30,2
14	28	104,9	28,3
15	28	92,2	24,9
16	28	131,8	35,6
17	28	121,6	32,9
18	28	135,5	36,6
Promedio =		116,32	31,42

Fuente: Elaboración propia, 2017

En el gráfico 4 se representa la resistencia promedio a esfuerzos de compresión respecto al tiempo de curado de los bloques.

Gráfico 4. Resistencia a compresión (f'c) vs. tiempo (días)



Fuente: Elaboración propia, 2017

Si se toma en consideración lo expuesto en la sección 3.8.1.1 la cual hace referencia al lugar de donde se seleccionaron las muestras para los ensayos de resistencia a la compresión, se puede observar claramente como los bloques presentan una caída considerable en la resistencia a compresión con respecto a la resistencia nominal mínima para bloques clase A, mencionada en el Código Sísmico de Costa Rica 2010, en su sección de anexos (A1.1 Unidades huecas de mampostería de concreto), o bien en la tabla 1 de la norma nacional INTE C90 la cual indica la resistencia mínima a la compresión sobre el área neta a veintiocho días.

#### **4.1.4 Ensayo de bloque a la compresión para estimación de $F_{bk}$ y obtención de $f_s$ deseado.**

Dado que los bloques seleccionados para los ensayos a esfuerzos de compresión no cumplieron con la resistencia nominal requerida se tomó una muestra realizada por Productos de Concreto con la misma fecha de moldeo y ensayo a la compresión que la muestra seleccionada en esta investigación. Esta decisión se tomó debido a que la estimación del  $F_{bk}$  se va a reflejar directamente en los especímenes de 5 cm x 10 cm, los cuales se pretende que cumplan con la resistencia mínima requerida.

Para la estimación del  $F_{bk}$  se hace referencia a un lote de seis unidades de mampostería a los cuales se le realizaron el ensayo a resistencia a la compresión siguiendo el procedimiento descrito en la norma INTE C50, al promediar la resistencia de los seis elementos se puede hacer referencia a un valor típico utilizado en la planta.

Con base en los cálculos realizados en la sección 4.1.2.1 de este capítulo, se pretende proponer una densidad seca, para esto se tomó una muestra de cinco elementos (tabla 12). Con el desarrollo de esta sección, se pretende encontrar la resistencia esperada de  $F_{bk}$  para posteriormente obtener la resistencia meta  $f_s$  de los especímenes de 5 cm x 10 cm. Los elementos de mampostería se ensayaron a veintiocho días. A continuación, se presenta la tabla con los valores utilizados para la determinación de  $F_{bk}$ .

Tabla 14. Resistencias a la compresión de los bloques de concreto según norma para la estimación de  $F_{bk}$

Tipo de bloque	Fecha de producción	Fecha de falla	Edad de falla (días)	Tipo de prueba	Resistencia Nominal (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga máx. (Tonf)	f'b área neta (kg/cm <sup>2</sup> )	f'b área bruta (kg/cm <sup>2</sup> )	ID registro
12x20x40	29/6/2017	27/7/2017	28	Compresión	133	37,14	137,5	79,36	706
12x20x40	29/6/2017	27/7/2017	28	Compresión	133	41,13	152,3	87,88	707
12x20x40	29/6/2017	27/7/2017	28	Compresión	133	38,00	140,7	81,20	708
12x20x40	29/6/2017	27/7/2017	28	Compresión	133	42,03	155,6	89,81	714
12x20x40	29/6/2017	27/7/2017	28	Compresión	133	40,38	149,5	86,28	715
12x20x40	29/6/2017	27/7/2017	28	Compresión	133	38,46	142,4	82,18	716
<b>Promedio =</b>					<b>133,0</b>	<b>39,5</b>	<b>146,3</b>	<b>84,5</b>	

Fuente: Elaboración propia, 2017

#### 4.1.4.1 Cálculo de resistencia a compresión sobre el área neta y área bruta

Para realizar el cálculo de resistencia a la compresión para determinar el  $F_{bk}$  se toma la carga promedio que dio el estudio de los seis bloques ensayados, los cálculos de absorción, densidad, área neta y área bruta se tomaron de la sección 4.1.2.1.

$$\text{Resistencia a la compresión sobre el área neta} \left( \frac{kg}{cm^2} \right) = P_{max} / A_n = \frac{39550}{280.5} = 141.0 \frac{kg}{cm^2}$$

(ecuación 9)

$$\text{Resistencia a la compresión sobre el área bruta} \left( \frac{kg}{cm^2} \right) = P_{max} / A_n = \frac{39550}{468} = 84.50$$

$$\frac{kg}{cm^2}$$

(ecuación 10)



#### 4.1.4.2 Cálculo de la resistencia a la compresión promedio a veintiocho días de los especímenes de (5 cm x 10 cm)

La fundamentación teórica para el desarrollo de este inciso se encuentra en el capítulo 2, sección 2.12.4 y 2.12.5

Tabla 15. Datos para la estimación de resistencia a la compresión promedio en función de una resistencia a la compresión dada

Tipo de Control/Equipo	Valores de coeficiente de variación (%)		
	Bueno	Regular	Pobre
1 - Control del proceso y experiencia del personal	5	15	25
2 - Equipo: Vibro-compresión y sensores de humedad	5	15	25
3 - Lote por volumen	5	10	15
4 - Lote por masa	10	15	20

Cálculo de coeficiente de variación	
1- Bueno	5
2- Regular	15
3- Regular	10
4- Regular	15
Promedio =	0,1125

Tabla de datos considerados	
$F_{bk} = (kg/cm^2) =$	84,5
CV =	0,113
$A_{net} (cm^2) =$	280,5
$A_{Bruta} (cm^2) =$	468,0

Tabla 16. Cálculos para la determinación de  $f_s$

Fuente: Elaboración propia, 2017

$f'_m$ promedio de los bloques (área bruta)			
$F_{bm} = \frac{F_{bk}}{(1 - 1,65 CV)}$			
$F_{bm} =$	103,77	kg/cm <sup>2</sup>	
$F_{bm} =$	10,17	MPa	

$f'_c$ promedio de los especímenes de 5 cm x 10 cm			
$f_s = \frac{F_{bm} \times 0,80}{\left(\frac{A_{net}}{A_{bruta}}\right)}$			
$f_s =$	138,49	kg/cm <sup>2</sup>	
$f_s =$	13,58	MPa	

Fuente: Elaboración propia, 2017

#### Memoria de cálculo:

$$F_{bm} = \frac{F_{bk}}{(1 - 1.65 CV)}$$

$$F_{bm} = \frac{84.5}{(1 - 1.65 \times 0.113)}$$

$$F_{bm} = 103.77 \frac{kg}{cm^2}$$

$$F_{bm} = \frac{f_s}{0.8^*} \times \frac{A_{net}}{A_{bruta}}$$

$$f_s = \frac{F_{bm} \times 0.80}{\left(\frac{A_{net}}{A_{bruta}}\right)} = \frac{103.77 \times 0.80}{\left(\frac{280.5}{468}\right)}$$

$$f_s = 138.5 \frac{kg}{cm^2}$$

$$f_s = 13.58 MPa$$

#### 4.2 Determinación de la masa para especímenes de 5 cm x 10 cm en función del volumen neto y masa húmeda del bloque en estudio

Para determinar la cantidad de masa humedad para realizar los especímenes de 5 cm x 10 cm se realiza un cálculo en función del volumen neto y masa húmeda del bloque en estudio con respecto al volumen teórico del cilindro de 5 cm x 10 cm. La relación propuesta se realiza como sigue.

$$\frac{x}{V_c} = \frac{W_r}{V_n}$$

(Ecuación 14)

Donde

$x$  = masa requerida para el espécimen de 5 cm x 10 cm

$V_c$  = Volumen teórico del cilindro de 5 cm x 10 cm

$W_r$  = masa húmeda del bloque

$V_n$  = Volumen neto del bloque

$$x = \frac{12.02 kg}{5330 cm^3} * 196.35 cm^3$$

$$x = 0.440 kg$$

Mediante una serie de ensayos se llegó a la conclusión de que la cantidad de masa utilizada en el cálculo realizado anteriormente sería para los especímenes de masa mínima, ya que la compactación de este elemento es mucho menor que la requerida. Al realizar los ensayos a compresión de los mismos se observó que la resistencia a la compresión requerida  $f_s$  no cumplió en dos de los tres especímenes ensayados. Por lo tanto, la cantidad de masa que se

propone para la elaboración de los cilindros de 5 cm x 10 cm son de, 460 g para masa máxima, 450 g para masa media y 440 g para masa mínima.

#### **4.3 Método de Frasson Jr para diseño de PC hecho en planta vs. laboratorio**

Para efectos de esta investigación se verificará el comportamiento de las curvas de resistencia a la compresión versus densidad seca de los cilindros propuestos por Frasson Jr. Para la elaboración de los especímenes de 5 cm x 10 cm se procede a utilizar únicamente el diseño de mezcla utilizado actualmente por Productos de Concreto en la producción de bloques de concreto en su planta denominada MASA, por lo tanto, se utilizan los mismos agregados adicionados al diseño de mezcla actual para elementos de mampostería, a los cuales se les realizó la caracterización granulométrica con el único fin de determinar los porcentajes de humedad en cada uno de ellos, ya que se pretende trabajar con parámetros de humedad constante y lo más cercano posible a las humedades utilizadas en la MASA.

Como se determinó anteriormente en la sección 4.2, las variaciones en las masas para la elaboración de los especímenes se basaron en una masa máxima, una masa media y una masa mínima, las cuales son determinadas por la fuerza y cantidad de golpes empleados con el mazo de hule al final de los 80 golpes previamente realizados con el apisonador. Se tomó como referencia los criterios efectuados por Frasson, en los cuales determinó la masa máxima de un espécimen de prueba donde los golpes empleados con el mazo de hule iban entre los 10 y 15 a una fuerza máxima para alcanzar los 10 cm de altura del espécimen. Si la fuerza de compactación y la cantidad de golpes realizados son excesivos para alcanzar los 10 cm del espécimen, o no se logra alcanzar dicha altura, se considera que la compactación final es imposible, y se deben variar entre 5 y 10 gramos de masa para alcanzar la altura indicada. Una vez determinada la masa máxima a utilizar se recomienda bajar entre 10 g y 15 g para cada una de las masas inferiores (media y mínima), en este estudio se decidió variar la masa en 10 g para cada una de las masas finales de los cilindros.

*Ilustración 35. Especimen con masa máxima, compactación óptima*



Fuente: Elaboración propia, 2017

Para la determinación de la masa máxima se realizaron cuatro especímenes de prueba en los cuales se obtuvo un promedio de 12 golpes con el mazo de hule una vez finalizado los 80 golpes previos con el apisonador.

Para el curado de los cilindros se utiliza el mismo método planteado por Frasson Jr, el cual consiste en la simulación de una cámara húmeda mediante la utilización de una caja de poliestireno con una lámina de agua en la parte inferior de la misma.

*Ilustración 36. Curado de cilindros en caja de poliestireno con lámina de agua*



Fuente: Elaboración propia, 2017

Una vez determinada la cantidad de masa que se le va a adicionar a los cilindros, se dispone a la elaboración de los mismos. La masa se debe dividir en cuatro partes iguales con el fin de mantener un adecuado acomodo de las partículas y uniformidad en la compactación.

Se realizaron 16 cilindros por cantidad de masa, es decir, 16 cilindros para masa máxima, 16 para masa media y 16 para masa mínima. Estos se dividieron de la siguiente manera, 9 especímenes se dejaron para la verificación de resistencia a la compresión (3 por edad), 4 de ellos se destinaron para la ejecución de la prueba de cohesión, y los últimos 3 para determinar la densidad seca de los especímenes.

Cabe recalcar que para la prueba de cohesión se dificultó lograr la velocidad propuesta por Frasson Jr, la cual indica que la velocidad de la carga debe ser de 1 kg/s. Se determinó que la carga estuvo dentro de un rango de entre 2 y 3 segundos por 1 kg, el cual se adicionó mediante una manguera de ½ pulgada con el fin de evitar un impacto inicial en el fondo del recipiente, ya que esto podría fisurar internamente los cilindros y arrojar un dato erróneo en dicho ensayo.

El equipo que se utilizó para la ejecución de la prueba de cohesión es el siguiente, una tabla de madera de 50 cm x 20 cm x 1.5 cm con un peso de 546 g y un balde de plástico de 806 g, al igual que lo mencionado en el capítulo 2 (sección 2.12.2 Evaluación de cohesión y la textura superficial) indica para que los cilindros tengan una cohesión adecuada y puedan ser transportados, estos deben superar la prueba con al menos 5 kg de carga, de lo contrario deberá dejarse un tiempo más en reposo para ser manipulados.

*Ilustración 37. Prueba de cohesión en los cilindros*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 38. Fisura del espécimen a los 5 kg*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 39. Falla total de los cilindros*



Fuente: Elaboración propia, 2017

Como verificación de la cohesión de los cilindros se realizaron dos ensayos por cantidad de masa (máxima, media y mínima). Es importante mencionar que una adecuada cohesión es de suma importancia en la producción, ya que estos elementos son de desmolde inmediato y deben de tener la capacidad de resistir esfuerzos por traslado de los mismos hasta la zona de curado, además, una mala cohesión imposibilita la producción por desmoronamiento de los elementos, y cohesiones elevadas puede bajar considerablemente la producción ya que el tiempo de llenado y compactado de los elementos serían mucho mayor, lo que también provocará mayor desgaste en máquina de producción.

### 4.3.1 Caracterización granulométrica de los agregados según norma INTE C46

En esta sección se realizará toda la caracterización granulométrica de los agregados utilizados en la investigación, los cuales son los mismos que se utilizan actualmente en Productos de Concreto para la fabricación de mampostería estructural de hormigón. Los agregados que se disponen constan de dos agregados finos y uno grueso, los cuales son, arena industrial de Guápiles, arena industrial Cerro Minas y piedra “quinta” de Cerro Minas. La caracterización de dichos agregados se realizó según lo indica el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica en su norma INTE C46, la cual es el equivalente de la norma internacional ASTM C136-06 (Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates).

Con el fin de ejemplificar y dar al lector una mejor comprensión con respecto al contenido de humedad del agregado, se presenta una memoria de cálculo para determinar la humedad del agregado, la ecuación utilizada es la misma tanto para agregado grueso como para fino.

#### Memoria de cálculo

$$\%h = \left[ \frac{(W-D)}{D} \right] \times 100$$

$$W = \text{Peso original de la muestra} = 1276.7 \text{ g}$$

$$D = \text{Peso seco de la muestra lavada} = 1205 \text{ g}$$

$$\%h = \left[ \frac{(1276.7-1205)}{1205} \right] \times 100$$

$$\%h = 5.95$$

Tabla 17. Análisis granulométrico arena industrial Guápiles

1- ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS (ASTM C 136)							
Malla (mm)	Malla nominal	Peso retenido (g)	Ret. individual %	Ret. acumulado %	Total pasando %	Especificación mín (%)	Especificación máx (%)
25,4	1 pulg.		0	0	100		
19,1	3/4 pulg.		0	0	100		
12,7	1/2 pulg.		0	0	100		
9,5	3/8 pulg.		0	0	100	100	100
4,75	#4	71,400	7	7	93	95	100
2,36	#8	358,600	33	39	61	80	100
1,18	#16	245,600	22	62	38	50	85
0,6	#30	154,500	14	76	24	25	60
0,3	#50	116,200	11	86	14	5	30
0,15	#100	86,100	8	94	6	0	10
0,075	#200	54,200	5	99	1		
0	Charola	11,600	1	100	0		
Total (g) =		1098,20	M.F. =		3,63		

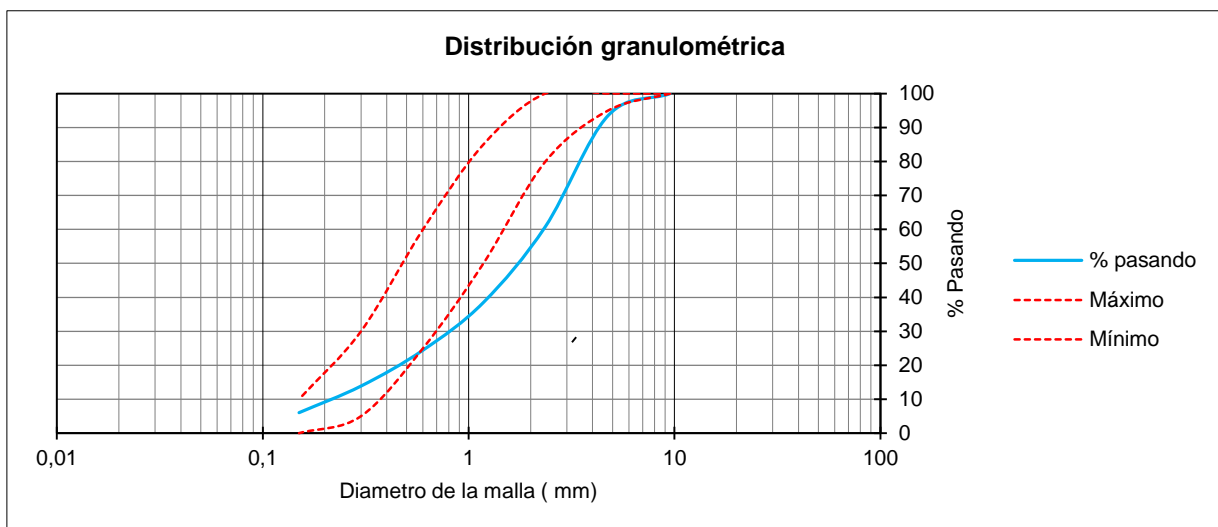
Fuente: Elaboración propia, 2017

Tabla 18. Contenido de humedad de arena industrial Guápiles

3- CONTENIDO DE HUMEDAD (ASTM C-566)		
Peso seco original de la muestra + recipiente =	1836,9	g
Peso recipiente =	560,20	g
Peso original de la muestra =	1276,70	g
Peso seco de la muestra lavada + recipiente =	1765,2	g
Peso recipiente =	560,20	g
Peso seco de la muestra lavada =	1205	g
% de humedad =		5,95

Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 5. Distribución granulométrica arena industrial Guápiles



Fuente: Elaboración propia, 2017



Tabla 19. Análisis granulométrico arena industrial Cerro Minas

1- ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS (ASTM C 136)							
Malla (mm)	Malla nominal	Peso retenido (g)	Ret. individual %	Ret. acumulado %	Total pasando %	Especificación mín (%)	Especificación máx (%)
25,4	1 pulg.		0	0	100		
19,1	3/4 pulg.		0	0	100		
12,7	1/2 pulg.		0	0	100		
9,5	3/8 pulg.		0	0	100	100	100
4,75	#4		0	0	100	95	100
2,36	#8	293,20	25	25	75	80	100
1,18	#16	353,10	30	55	45	50	85
0,6	#30	212,70	18	73	27	25	60
0,3	#50	138,50	12	85	15	5	30
0,15	#100	95,10	8	93	7	0	10
0,075	#200	68,50	6	99	1		
0	Charola	13,70	1	100	0		
Total (g) =		1174,80	M.F. =		3,31		

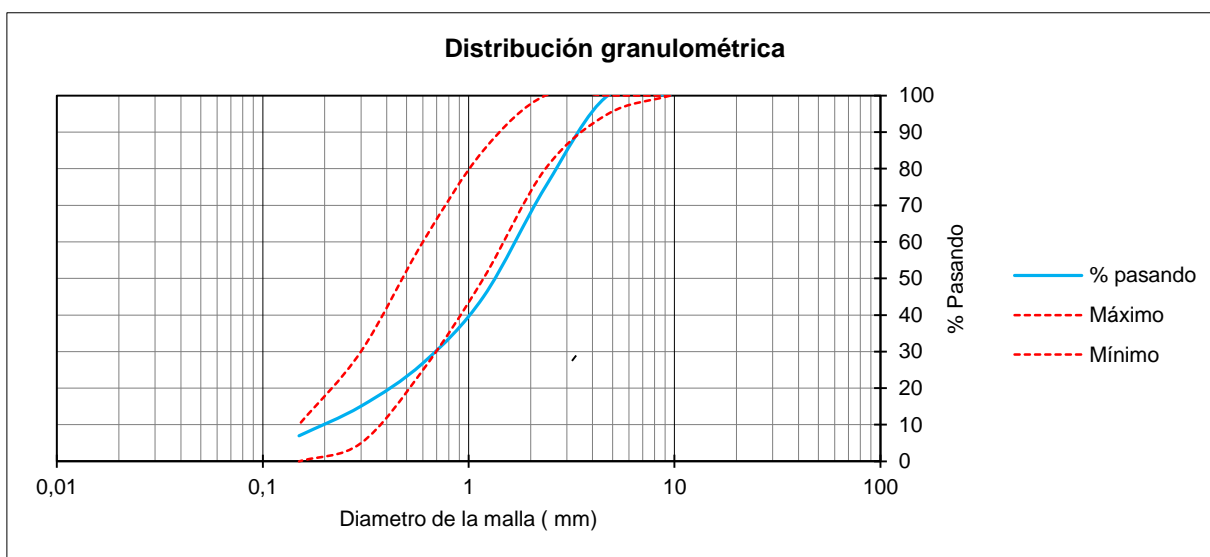
Fuente: Elaboración propia, 2017

Tabla 20. Contenido de humedad arena industrial Cerro Minas

3- CONTENIDO DE HUMEDAD (ASTM C-566)		
Peso seco original de la muestra + recipiente =	1876,4	g
Peso recipiente =	542,80	g
Peso original de la muestra =	1333,60	g
Peso seco de la muestra lavada + recipiente =	1782,2	g
Peso recipiente =	542,80	g
Peso seco de la muestra lavada =	1239,4	g
% de humedad =		7,60

Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 6. Distribución granulométrica arena industrial Cerro Minas



Fuente: Elaboración propia, 2017

Tabla 21. Análisis granulométrico piedra quinta Cerro Minas

CARACTERISTICAS DEL AGREGADO GRUESO							
1- ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS (ASTM C 136)							
Malla (mm)	Malla nominal	Peso retenido (g)	Ret. individual %	Ret. acumulado %	Total pasando %	Especificación mín (%)	Especificación máx (%)
25.4	1 pulg.		0	0	100		
19.1	3/4 pulg.		0	0	100		
12.7	1/2 pulg.		0	0	100	100	100
9.5	3/8 pulg.	21.80	1	1	99	85	100
4.75	#4	1370.90	63	64	36	10	30
2.36	#8	693.50	32	96	4	0	10
1.18	#16	63.00	3	98	2		
0.6	#30	0.00	0	98	2		
0.3	#50	0.00	0	98	2		
0.15	#100	0.00	0	98	2		
0.075	#200	32.60	1	100	0		
0	Charola	0.50	0	100	0		
Total (g) =		2182.30	M.F. =		5.54		

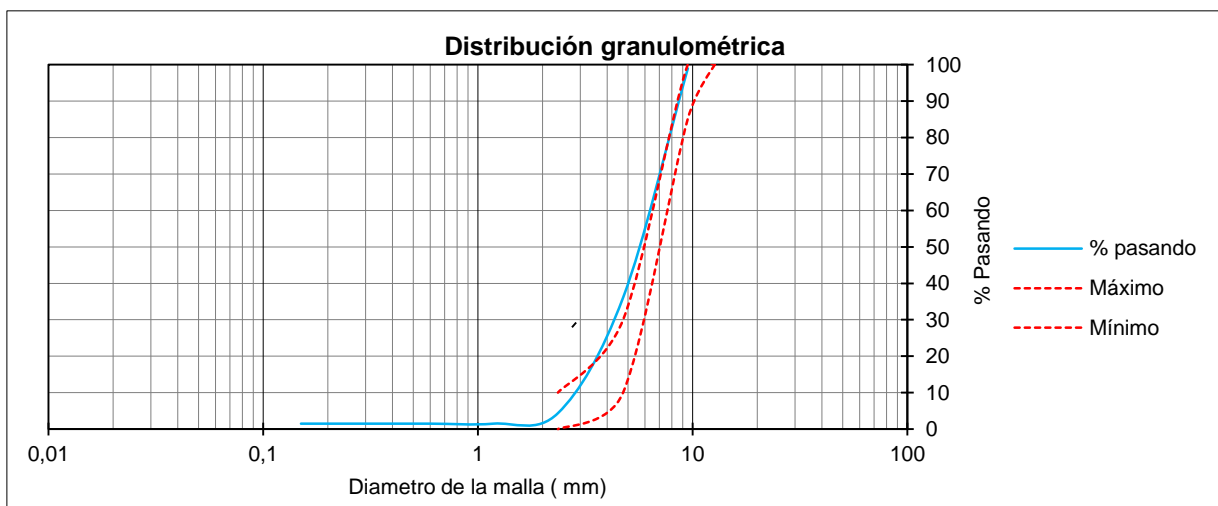
Fuente: Elaboración propia, 2017

Tabla 22. Contenido de humedad piedra quinta Cerro Minas

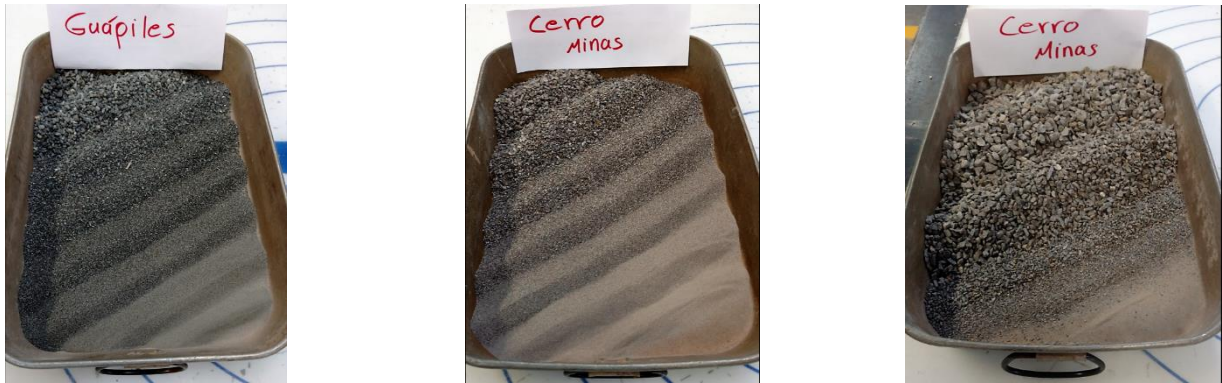
3- CONTENIDO DE HUMEDAD (ASTM C-566)		
Peso seco original de la muestra + recipiente =	2675.4	g
Peso recipiente =	422.70	g
Peso original de la muestra =	2252.70	g
Peso seco de la muestra lavada + recipiente =	2611	g
Peso recipiente =	422.70	g
Peso seco de la muestra lavada =	2188.3	g
% de humedad =		2.94

Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 7. Distribución granulométrica piedra quinta Cerro Minas



Fuente: Elaboración propia, 2017



*Ilustración 40. Distribución granulométrica de los agregados*

Fuente: Elaboración propia, 2017

#### **4.3.2 Ensayos de los cilindros 5 cm x 10 cm con el diseño de mezcla actual utilizada para la fabricación de bloques**

En esta sección se encuentran las resistencias a la compresión obtenidas de los especímenes de 5 cm x 10 cm tanto de los que se realizaron con la mezcla tomada directamente de la planta, como los que se elaboraron con el mismo diseño de mezcla a diferencia de que esta fue realizada en el laboratorio. También se recopilan los datos obtenidos por cohesión, textura superficial y densidad seca al horno de los cilindros elaborados. Es importante recalcar que a pesar de que el valor teórico del diámetro de los cilindros debe ser de 5 cm y la altura debe ser de 10 cm, sin embargo, pueden existir ciertas discrepancias en las dimensiones de los cilindros, debido a que los moldes se pagaron a hacer ya que estos no existen en el mercado, y por lo tanto, no hay una norma que supervise las dimensiones exactas de los mismos.

*Tabla 23. Datos de los ensayos realizados a los cilindros con el diseño de mezcla actual*

Tabla resumen de diseño de mezcla actual de PC, tomado de la MASA								
Cant. Masa	Masa húmeda (g)	Humedad (%)	Cohesión (kg)	Resist. Comp. 24 h (MPa)	Resist. Comp. 7 días (MPa)	Resist. Comp. 28 días (MPa)	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad húmeda (kg/m <sup>3</sup> )
Máx	460	6,25 %	9	4,96	11,39	16,21	2169	2342
Med	450	7,10 %	5	4,99	10,38	14,77	2154	2330
Mín	440	6,17 %	3,5	4,53	9,46	11,63	2137	2319

Tabla resumen de diseño de mezcla actual de PC en Laboratorio								
Cant. Masa	Masa húmeda (g)	Humedad (%)	Cohesión (kg)	Resist. Comp. 24 h (MPa)	Resist. Comp. 7 días (MPa)	Resist. Comp. 28 días (MPa)	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad húmeda (kg/m <sup>3</sup> )
Máx	460,4	6,56 %	12,0	4,4	10,7	18,5	2181	2360
Med	450,4	6,04 %	6,5	4,6	9,8	16,1	2154	2332
Mín	440,3	6,17 %	4,0	4,5	9,0	14,8	2138	2317

Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 41. Ensayo de resistencia a la compresión en espécimen de 5 cm x 10 cm*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 42. Ensayo a compresión del espécimen de 5 cm x 10 cm mediante presa hidráulica*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 43. Ensayo a compresión del espécimen de 5 cm x 10 cm*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 44. Ensayo a 28 días cilindro de masa máxima hecho con mezcla tomada directamente de la planta*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 45. Ensayo a 28 días cilindro de masa media hecho con mezcla tomada directamente de la planta*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 46. Ensayo a 28 días cilindro de masa mínima hecho con mezcla tomada directamente de la planta*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 47. Evaluación de textura superficial, cilindro masa máxima vs. bloque de 12 cm x 20 cm x 40 cm*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 48. Evaluación de textura superficial, cilindro masa media vs. bloque de 12 cm x 20 cm x 40 cm*



Fuente: Elaboración propia, 2017



Ilustración 49. Evaluación de textura superficial, cilindro masa mínima vs. bloque de 12 cm x 20 cm x 40 cm

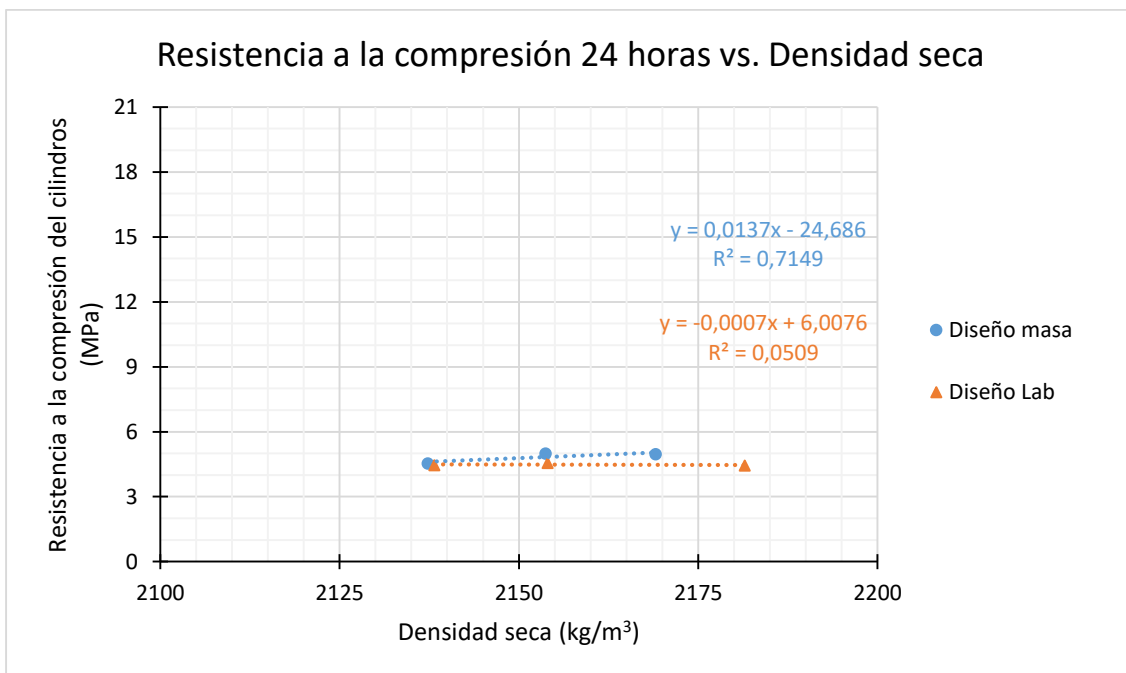


Fuente: Elaboración propia, 2017

#### 4.3.2.1 Curvas obtenidas mediante los ensayos de los cilindros de 5 cm x 10 cm

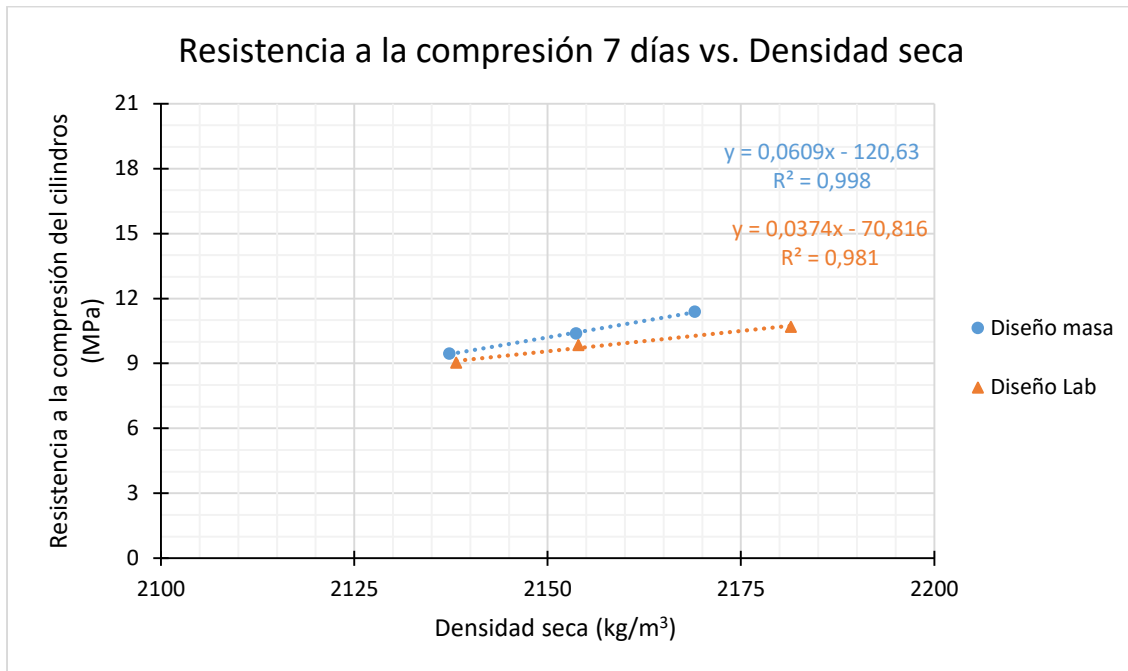
Con los datos obtenidos y tabulados en la sección 4.3.2 (tabla 23) se realizan las curvas de resistencia a la compresión a una edad dada versus densidad seca, en esta sección se podrá ejemplificar de manera gráfica el comportamiento y comparación de cada una de las mezclas.

Gráfico 8. Resistencia a la compresión a 24 horas vs. densidad seca



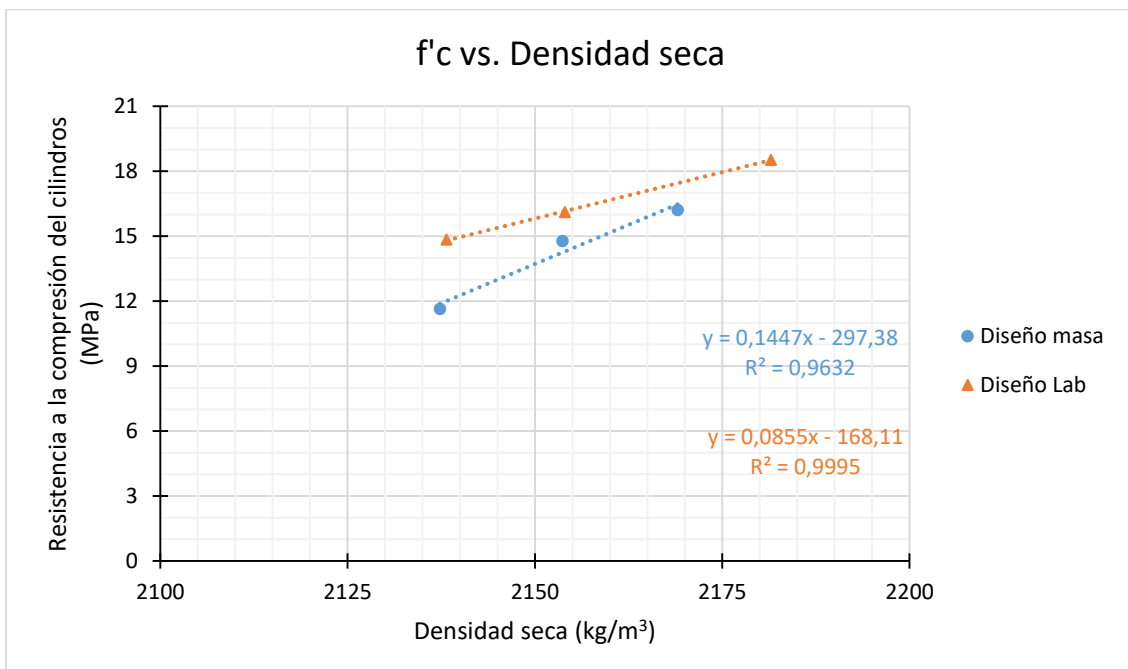
Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 9. Resistencia a la compresión a 7 días vs. densidad seca



Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 10. Resistencia a la compresión f'c vs. densidad seca



Fuente: Elaboración propia, 2017



### 4.3.3 Calibración mediante el método de Frasson Jr

En el presente inciso se desarrollará la calibración del equipo mediante la metodología propuesta por Frasson Jr. Se presentarán curvas de calibración con datos obtenidos durante el proceso experimental. Cabe destacar que en la siguiente gráfica se modificó el eje x, con el fin de tener mayor y mejor apreciación de los datos. Para realizar dicha curva de calibración se tomaron los datos de la tabla 14 para la resistencia a la compresión promedio de los elementos de mampostería. Mientras que para trazar la curva se tomaron los datos de la tabla 24, los cuales salieron de los ensayos a la compresión de los especímenes de 5 cm x 10 cm.

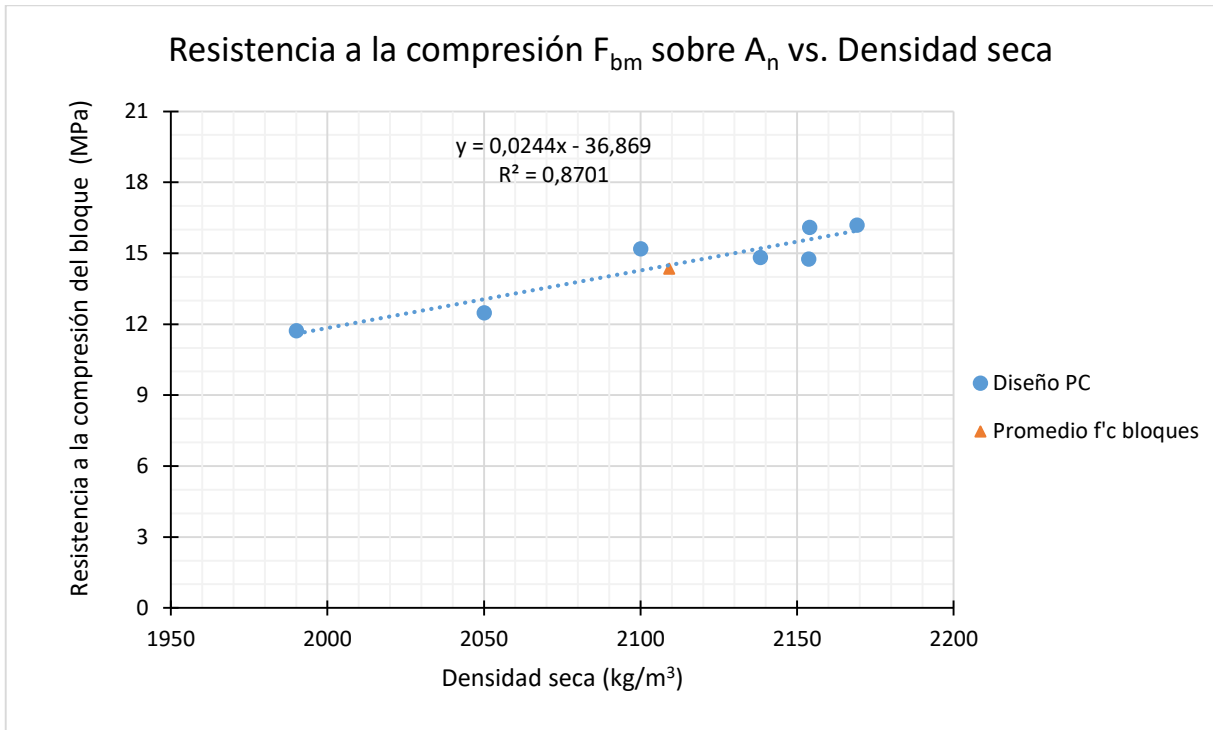
*Tabla 24. Resistencia a la compresión de los cilindros convertidos a resistencia a la compresión de bloques*

<b>Cilindros</b>	<b>f'c (MPa)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
F <sub>bm</sub> =	15,2	2100
F <sub>bm</sub> =	12,5	2050
F <sub>bm</sub> =	11,7	1990
F <sub>bm</sub> =	16,1	2169
F <sub>bm</sub> =	14,8	2138
F <sub>bm</sub> =	16,2	2169
F <sub>bm</sub> =	14,8	2154

Fuente: Elaboración propia, 2017

En el gráfico 12 la línea azul representa la curva de mejor ajuste entre las resistencias a la compresión de los cilindros en función de una resistencia a la compresión de los bloques (F<sub>bm</sub>), mientras que el punto naranja representa la resistencia a la compresión promedio de los bloques ensayados. Por lo tanto, se puede observar que mediante la curva descrita en la gráfica se puede predecir la resistencia a la compresión de los bloques con una densidad especificada de los mismos.

Gráfico 11. Curva de calibración en función de la resistencia a la compresión de los cilindros de 5 cm x 10 cm



Fuente: Elaboración propia, 2017

#### 4.4 Diseño de mezcla de concreto liviano con EPS

En esta sección se realizará la incorporación de las partículas de EPS al diseño de mezcla utilizado actualmente en Productos de Concreto para la fabricación de elementos de mampostería. Como primera parte, se debe determinar la densidad real y densidad aparente de las partículas de poliestireno expandido, posteriormente se realizará la incorporación de las partículas a la mezcla con el fin de obtener una densidad aproximada de concreto de  $1800 kg/m^3$ , una vez determinada la cantidad de EPS que se debe adicionar a la mezcla para obtener la densidad anteriormente mencionada se procede a realizar los especímenes de 5 cm x 10 cm.

Mediante una serie de pruebas experimentales se va a determinar el mejor diseño con EPS, al cual se le va a hacer el estudio completo propuesto por Frasson Jr, para obtener este diseño se van a realizar especímenes de 5 cm x 10 cm para fallar únicamente a las veinticuatro horas,

con el único fin de encontrar el diseño que arroje la resistencia a la compresión más cercana a la resistencia requerida para la fabricación de los bloques de concreto.

A todas las pruebas que se van a realizar a veinticuatro horas se les va a mantener como constata el contenido de humedad en la mezcla, se van a hacer 9 cilindros por diseño (3 para masa máxima, 3 para masa media y 3 para masa mínima), la cantidad de diseños realizadas son las siguientes: #1 mantener el mismo cemento utilizado en diseño de mezcla actual (cemento MP) y aumentar su contenido en un 10%, 20% y 30%, #2 cambiar el cemento por UG-AR y aumentar su contenido en un 10%, 20% y 30%, luego de ensayar estos diseños se toma el que arroja mejores resultados de resistencia a la compresión y se realizan dos diseños más, #3 sustituir el EPS de (BASF) por “politerm” EPS con aditivo para lograr mejor uniformidad y adherencia de las partículas, al igual que los diseños anteriores se aumenta el contenido de cemento en un 10%, 20% y 30%, #4 este diseño consiste en adicionar un aditivo acelerante de la resistencia al diseño #3. De estos 4 diseños se toma el de mejores resultados y se realiza el estudio completo propuesto por Frasson Jr.

#### **4.4.1 Determinación de la densidad real y aparente del poliestireno expandido**

Para la determinación de la densidad real de EPS se tomó cinco partículas de muestras de manera aleatoria, a las cuales se les determinó el peso mediante una balanza analítica suministrada por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), posteriormente se extrajo veinte muestras más de manera aleatoria para tomar las dimensiones del diámetro y obtener la densidad de las partículas, mediante la típica fórmula de densidad igual a masa entre volumen.

Seguidamente se realizó la estimación de la densidad aparente del poliestireno expandido mediante la siguiente metodología: se tomó un recipiente calibrado (peso y volumen definido) el cual se llenó y tomó la lectura del peso con las partículas quince veces, el modo de llenado del recipiente se realizó de la misma manera las quince veces.

## Memoria de cálculo de densidad real

$$\rho_r = \frac{m}{V}$$

(Ecuación 15)

$$m = 0.00018 \text{ g}$$

$$V = 13.801 \text{ mm}^3$$

$$\rho_r = 13.04 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tabla 25. Muestras de poliestireno expandido para el cálculo de la densidad real

Muestra de EPS para densidad real																																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Diámetros aleatorios</th> </tr> <tr> <th>Cantidad</th> <th>Diámetro (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>3,45</td></tr> <tr><td>2</td><td>3,03</td></tr> <tr><td>3</td><td>3,09</td></tr> <tr><td>4</td><td>3,07</td></tr> <tr><td>5</td><td>2,07</td></tr> <tr><td>6</td><td>2,97</td></tr> <tr><td>7</td><td>2,30</td></tr> <tr><td>8</td><td>3,19</td></tr> <tr><td>9</td><td>3,20</td></tr> <tr><td>10</td><td>3,41</td></tr> <tr><td>11</td><td>2,52</td></tr> <tr><td>12</td><td>3,12</td></tr> <tr><td>13</td><td>3,21</td></tr> <tr><td>14</td><td>2,78</td></tr> <tr><td>15</td><td>2,21</td></tr> <tr><td>16</td><td>2,81</td></tr> <tr><td>17</td><td>2,69</td></tr> <tr><td>18</td><td>4,06</td></tr> <tr><td>19</td><td>3,02</td></tr> <tr><td>20</td><td>3,32</td></tr> <tr> <td><b>Promedio</b></td> <td><b>2,976</b></td> </tr> </tbody> </table>		Diámetros aleatorios		Cantidad	Diámetro (mm)	1	3,45	2	3,03	3	3,09	4	3,07	5	2,07	6	2,97	7	2,30	8	3,19	9	3,20	10	3,41	11	2,52	12	3,12	13	3,21	14	2,78	15	2,21	16	2,81	17	2,69	18	4,06	19	3,02	20	3,32	<b>Promedio</b>	<b>2,976</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Perlas de EPS</th> <th>Peso (g)</th> <th>Diámetro 1 (mm)</th> <th>Diámetro 2 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0,0001</td><td>3,03</td><td>1,1</td></tr> <tr><td>2</td><td>0,0001</td><td>3,02</td><td>1,76</td></tr> <tr><td>3</td><td>0,0001</td><td>2,7</td><td>2,85</td></tr> <tr><td>4</td><td>0,0001</td><td>3,2</td><td>1,56</td></tr> <tr><td>5</td><td>0,0005</td><td>3,48</td><td>2,32</td></tr> <tr> <td><b>Promedio</b></td> <td><b>0,00018</b></td> <td><b>3,086</b></td> <td><b>1,918</b></td> </tr> </tbody> </table>		Perlas de EPS	Peso (g)	Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	1	0,0001	3,03	1,1	2	0,0001	3,02	1,76	3	0,0001	2,7	2,85	4	0,0001	3,2	1,56	5	0,0005	3,48	2,32	<b>Promedio</b>	<b>0,00018</b>	<b>3,086</b>	<b>1,918</b>
Diámetros aleatorios																																																																													
Cantidad	Diámetro (mm)																																																																												
1	3,45																																																																												
2	3,03																																																																												
3	3,09																																																																												
4	3,07																																																																												
5	2,07																																																																												
6	2,97																																																																												
7	2,30																																																																												
8	3,19																																																																												
9	3,20																																																																												
10	3,41																																																																												
11	2,52																																																																												
12	3,12																																																																												
13	3,21																																																																												
14	2,78																																																																												
15	2,21																																																																												
16	2,81																																																																												
17	2,69																																																																												
18	4,06																																																																												
19	3,02																																																																												
20	3,32																																																																												
<b>Promedio</b>	<b>2,976</b>																																																																												
Perlas de EPS	Peso (g)	Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)																																																																										
1	0,0001	3,03	1,1																																																																										
2	0,0001	3,02	1,76																																																																										
3	0,0001	2,7	2,85																																																																										
4	0,0001	3,2	1,56																																																																										
5	0,0005	3,48	2,32																																																																										
<b>Promedio</b>	<b>0,00018</b>	<b>3,086</b>	<b>1,918</b>																																																																										
		<p>Volumen de esfera = <math>V = \frac{3}{4} * \pi * r^3</math></p>																																																																											
		<p>Densidad = <math>\rho = \frac{m}{V}</math></p>																																																																											
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Cálculo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Volumen =</td> <td>13,801</td> <td>mm<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>Densidad =</td> <td>1,304E-05</td> <td>g/mm<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>Densidad =</td> <td>13,04</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> </tr> </tbody> </table>		Cálculo			Volumen =	13,801	mm <sup>3</sup>	Densidad =	1,304E-05	g/mm <sup>3</sup>	Densidad =	13,04	kg/m <sup>3</sup>																																																														
Cálculo																																																																													
Volumen =	13,801	mm <sup>3</sup>																																																																											
Densidad =	1,304E-05	g/mm <sup>3</sup>																																																																											
Densidad =	13,04	kg/m <sup>3</sup>																																																																											

Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 50. Peso de las esferas de EPS en balanza analítica*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 51. Medición del diámetro de las esferas de EPS*



Fuente: Elaboración propia, 2017

## Memoria de cálculo de densidad aparente

$$\rho_a = \frac{m}{V}$$

(Ecuación 16)

Peso del recipiente = 3889 g

Peso de muestra + recipiente = 3980.19 g

Peso de muestra = 91.19 g

Volumen del recipiente = 0.00706 m<sup>3</sup>

$$\rho_a = \frac{(91.19 \div 1000)}{0.00706}$$

$$\rho_a = 12. \frac{kg}{m^3}$$

Tabla 26. Muestra de poliestireno expandido para cálculo de densidad aparente

Muestra de EPS para densidad aparente		
<b>Peso aparente con volumen constante</b>		
Cantidad	P recipiente + EPS (g)	P EPS (g)
1	3979	90,00
2	3979,2	90,20
3	3980,2	91,20
4	3981,4	92,40
5	3980,1	91,10
6	3980,2	91,20
7	3980,9	91,90
8	3980,9	91,90
9	3980,6	91,60
10	3980,7	91,70
11	3980	91,00
12	3979,5	90,50
13	3980,5	91,50
14	3980,9	91,90
15	3978,7	89,70
<b>Promedio</b>	<b>3980,19</b>	<b>91,19</b>

P recipiente =	3889,00	g
V recipiente =	7,06	L
V recipiente =	0,00706	m <sup>3</sup>

<b>Densidad =</b>	$\rho = \frac{m}{V}$
-------------------	----------------------

Cálculo de densidad aparente		
<b>Densidad =</b>	12,92	g/L
<b>Densidad =</b>	12,92	kg/m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 52. Toma de muestra de EPS para densidad aparente*



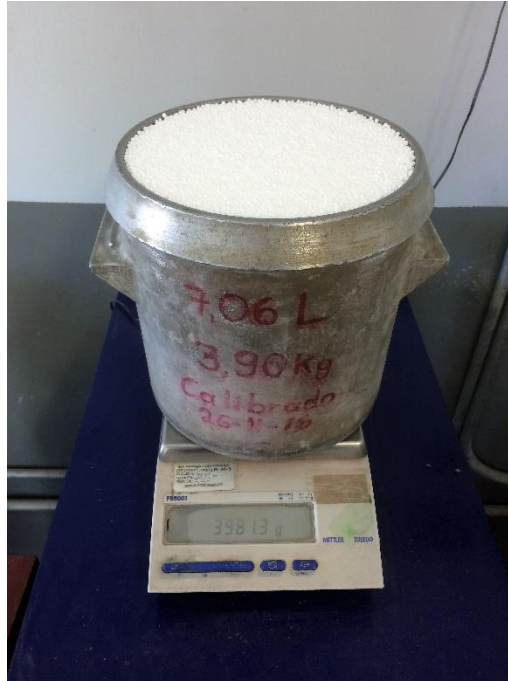
Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 53. Muestra de EPS para cálculo de densidad aparente*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 54. Toma de lectura del peso de la muestra de EPS para cálculo de densidad aparente*



Fuente: Elaboración propia, 2017

#### **4.4.2 Determinación de la cantidad de EPS adicionada a la mezcla de concreto para obtener una densidad de $1800 \text{ kg/m}^3$**

En la siguiente sección se realizará de manera teórica la determinación de la cantidad de poliestireno expandido que se le debe adicionar a la mezcla de concreto para obtener una densidad aproximada de  $1800 \text{ kg/m}^3$ , para el cálculo de la cantidad de EPS adicionada a la mezcla de concreto se propuso la siguiente ecuación. Es importante resaltar que la cantidad de EPS de dosificación se obtuvo mediante la densidad aparente del poliestireno expandido, esta decisión se tomó debido a que en el mercado el EPS se consigue mediante el volumen aparente requerido.



$$\gamma_d = \frac{1m^3 \times \gamma_c + V_{EPS}m^3 \times \gamma_{EPS}}{1m^3 + V_{EPS}m^3} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde

$\gamma_d =$  Densidad deseada

$\gamma_c =$  Densidad del concreto

$\gamma_{EPS} =$  Densidad del poliestireno expandido

$V_{EPS}m^3 =$  Volumen requerido de EPS

A continuación, se presenta la memoria de cálculo realizada para la determinación del EPS de dosificación para obtener una densidad de concreto de aproximadamente 1800 kg/m<sup>3</sup>.

Memoria de cálculo

$$\gamma_d = \frac{1m^3 \times \gamma_c + V_{EPS}m^3 \times \gamma_{EPS}}{1m^3 + V_{EPS}m^3}$$

$$1m^3 + V_{EPS}m^3 = \frac{1m^3 \times \gamma_c + V_{EPS}m^3 \times \gamma_{EPS}}{\gamma_d}$$

$$1m^3 + V_{EPS}m^3 = \frac{1m^3 \times \gamma_c}{\gamma_d} + \frac{V_{EPS}m^3 \times \gamma_{EPS}}{\gamma_d}$$

$$V_{EPS}m^3 - V_{EPS}m^3 \times \frac{\gamma_{EPS}}{\gamma_d} = \frac{1m^3 \times \gamma_c}{\gamma_d} - 1m^3$$

$$V_{EPS}m^3 \left[ 1 - \frac{\gamma_{EPS}}{\gamma_d} \right] = \frac{1m^3 \times \gamma_c}{\gamma_d} - 1m^3$$

$$V_{EPS}m^3 \left[ 1 - \frac{12.92 \frac{kg}{m^3}}{1800 \frac{kg}{m^3}} \right] = \frac{1m^3 \times 2100 \frac{kg}{m^3}}{1800 \frac{kg}{m^3}} - 1m^3$$

$$V_{EPS}m^3 [0.99282 m^3] = 0.16667 m^3$$

$$V_{EPS}m^3 = \frac{0.16667 m^3}{0.99282 m^3}$$

$$V_{EPS} = 0.1678 m^3$$

Según el cálculo realizado anteriormente la cantidad de EPS que se le debe adicionar a la mezcla de concreto para obtener una densidad aproximada de  $1800 \text{ kg/m}^3$  es de  $0.1678 \text{ m}^3$ , sin embargo, mediante el proceso experimental se llegó a la conclusión que esa cantidad de EPS no es suficiente para alcanzar la densidad deseada, por lo tanto, después del proceso experimental se llegó a la conclusión que la cantidad requerida de EPS para una densidad aproximada de  $1800 \text{ kg/m}^3$  es de  $0.40 \text{ m}^3$ , o bien  $5.06 \text{ kg}$  de poliestireno expandido por  $1 \text{ m}^3$  de concreto.

#### **4.4.3 Cálculo de la resistencia a la compresión promedio a 24 horas de los especímenes de 5 cm x 10 cm con adición de poliestireno expandido**

A continuación se presentan los cálculos respectivos de resistencia a la compresión meta para los cilindros con EPS, a los cuales se les va a realizar el ensayo de resistencia a la compresión a las 24 horas, es por esta razón que al igual que en la sección 4.1.4.2 se deben realizar los cálculos del  $f_s$  requerido en los especímenes de 5 cm x 10 cm, con la diferencia de que la estimación del  $f_s$  se realizara a las 24 horas y no a los 28 días como se realizó en la sección 4.1.4.2.

Tabla 27. Datos para la estimación de resistencia a la compresión promedio de una resistencia a la compresión dada

Tipo de Control/Equipo	Valores de coeficiente de variación (%)		
	Buena	Regular	Pobre
1 - Control del proceso y experiencia del personal	5	15	25
2 - Equipo: Vibro-compresión y sensores de humedad	5	15	25
3 - Lote por volumen	5	10	15
4 - Lote por masa	10	15	20

Cálculo de coeficiente de variación	
1- Buena	5
2- Regular	15
3- Regular	10
4- Regular	15
Promedio =	0,1125

Tabla de datos considerados	
$F_{bk} = (\text{kg/cm}^2)$	23,8
CV =	0,113
$A_{net} (\text{cm}^2) =$	280,5
$A_{bruta} (\text{cm}^2) =$	468,0

Fuente: Elaboración propia, 2017

Tabla 28. Cálculos para determinación de  $f_s$  requerido

$f'_m$ promedio de los bloques (área bruta)			
$F_{bm} = \frac{F_{bk}}{(1 - 1,65 CV)}$			
$F_{bm} =$	29,19	kg/cm <sup>2</sup>	
$F_{bm} =$	2,86	MPa	

$f'_c$ promedio de los especímenes de 5 cm x 10 cm			
$f_s = \frac{F_{bm} \times 0,80}{\left(\frac{A_{net}}{A_{bruta}}\right)}$			
$f_s =$	38,96	kg/cm <sup>2</sup>	
$f_s =$	3,82	MPa	

Fuente: Elaboración propia, 2017

**Memoria de cálculo:**

$$F_{bm} = \frac{F_{bk}}{(1 - 1.65 CV)}$$

$$F_{bm} = \frac{23.8}{(1 - 1.65 \times 0.113)}$$

$$F_{bm} = 29.19 \frac{kg}{cm^2}$$

$$F_{bm} = \frac{f_s}{0.8^*} \times \frac{A_{net}}{A_{bruta}}$$

$$f_s = \frac{F_{bm} \times 0.80}{\left(\frac{A_{net}}{A_{bruta}}\right)} = \frac{29.19 \times 0.80}{\left(\frac{280.5}{468}\right)}$$

$$f_s = 38.96 \frac{kg}{cm^2}$$

$$f_s = 3.82 MPa$$

#### 4.4.4 Determinación de la cantidad de masa para especímenes de 5 cm x 10 cm con EPS para una densidad de 1800 kg/m<sup>3</sup>

El cálculo de la cantidad de masa que se debe adicionar a los cilindros de 5 cm x 10 cm para obtener una densidad aproximada de 1800 kg/m<sup>3</sup> se realiza en función de la densidad seca y el volumen neto determinado en los especímenes realizados con el diseño de mezcla actual. Mediante una regla de tres se calcula la cantidad de masa aproximada.

$$\frac{W_{sc}}{\rho_{sc}} = \frac{W_{C-EPS}}{\rho_{deseada}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde

$W_{C-EPS}$  = Masa requerida para el espécimen de 5 cm x 10 cm con EPS

$\rho_{deseada}$  = Densidad deseada del concreto

$W_{sc}$  = Masa seca del cilindro

$\rho_{sc}$  = Densidad seca del cilindro

$$W_{C-EPS} = \frac{426.10 \text{ g}}{2161 \text{ kg/m}^3} * 1800 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{C-EPS} = 354.9 \text{ g}$$

Para la elaboración de los especímenes de 5 cm x 10 cm se tomó el valor obtenido como masa media, el cual se redondeó a 355 g, para masa máxima y mínima se aumentó y disminuyó el valor de masa media en 10 g respectivamente, o bien, 365 g para masa máxima, 355 g para media y 345 g para masa mínima.

#### **4.5 Método de Frasson Jr para determinar el mejor diseño de mezcla liviana con EPS**

En este aparato se pretende realizar todo el proceso experimental para determinar el mejor diseño de mezcla liviana, los ensayos se realizarán únicamente a 24 horas con fin de determinar la resistencia a la compresión de los especímenes realizados, y evaluar si es posible la implementación de dicha mezcla en la fabricación de elementos de mampostería estructural. Para que el diseño de mezcla sea aprobado, los especímenes de 5 cm x 10 cm deben ser capaces de tener una resistencia a esfuerzos de compresión de al menos 3.82 MPa a 24 horas de su elaboración, de lo contrario el diseño de mezcla no cumplirá con los requisitos para la fabricación de bloques de concreto estructural. Se realizarán únicamente 9 cilindros por mezcla (3 para masa máxima, 3 para masa media y 3 para masa máxima).

Es importante destacar que durante el desarrollo de esta sección las gráficas cambian de escala, con el fin de brindar una mejor apreciación y comprensión al lector, ya que si se mantiene la misma escala que la utilizada en los cilindros con el diseño de mezcla actual sección 4.3.2.1 sería imposible la lectura de los valores en las gráficas, ya que los datos obtenidos en esta sección son mucho menores que los obtenidos en la sección 4.3.2.1.

#### 4.5.1 Ensayos de los especímenes de 5 cm x 10 cm utilizando cemento MP y poliestireno expandido

A continuación, se presenta el proceso experimental de los ensayos realizados a 24 horas de los cilindros de 5 cm x 10 cm para la verificación de la resistencia a la compresión.

Tabla 29. Resumen de los datos obtenidos en los cilindros realizados con cemento MP

<b>+10% de Cemento MP</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,17 %	1816	1,01
24 horas	Med	355	6,64 %	1766	0,83
24 horas	Min	345	6,15 %	1714	0,73
<b>+20% de Cemento MP</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,34 %	1814	1,04
24 horas	Med	355	6,39 %	1765	0,90
24 horas	Min	345	6,15 %	1716	0,58
<b>+30% de Cemento MP</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,36 %	1814	1,18
24 horas	Med	355	6,13 %	1764	1,34
24 horas	Min	345	6,38 %	1715	0,98

Fuente: Elaboración propia, 2017

Ilustración 55. Cilindro de 5 cm x 10 cm con EPS



Fuente: Elaboración propia, 2017

En la ilustración 55 se puede apreciar la gran cantidad de partículas de poliestireno expandido en la mezcla, lo que provoca una caída considerable en la resistencia debido a que las esferas de EPS no son capaces de tomar esfuerzos.

Ilustración 56. Ensayo de resistencia a la compresión mediante prensa hidráulica



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 57. Ensayo a compresión del espécimen de 5 cm x 10 cm con EPS*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 58. Ensayo a 24 horas en cilindro de masa mínima*



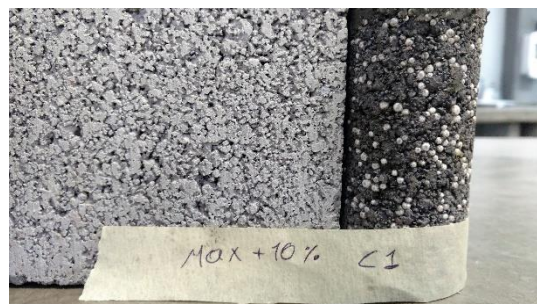
Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 59. Textura superficial del cilindro con EPS vs. bloque*



Fuente: Elaboración propia, 2017

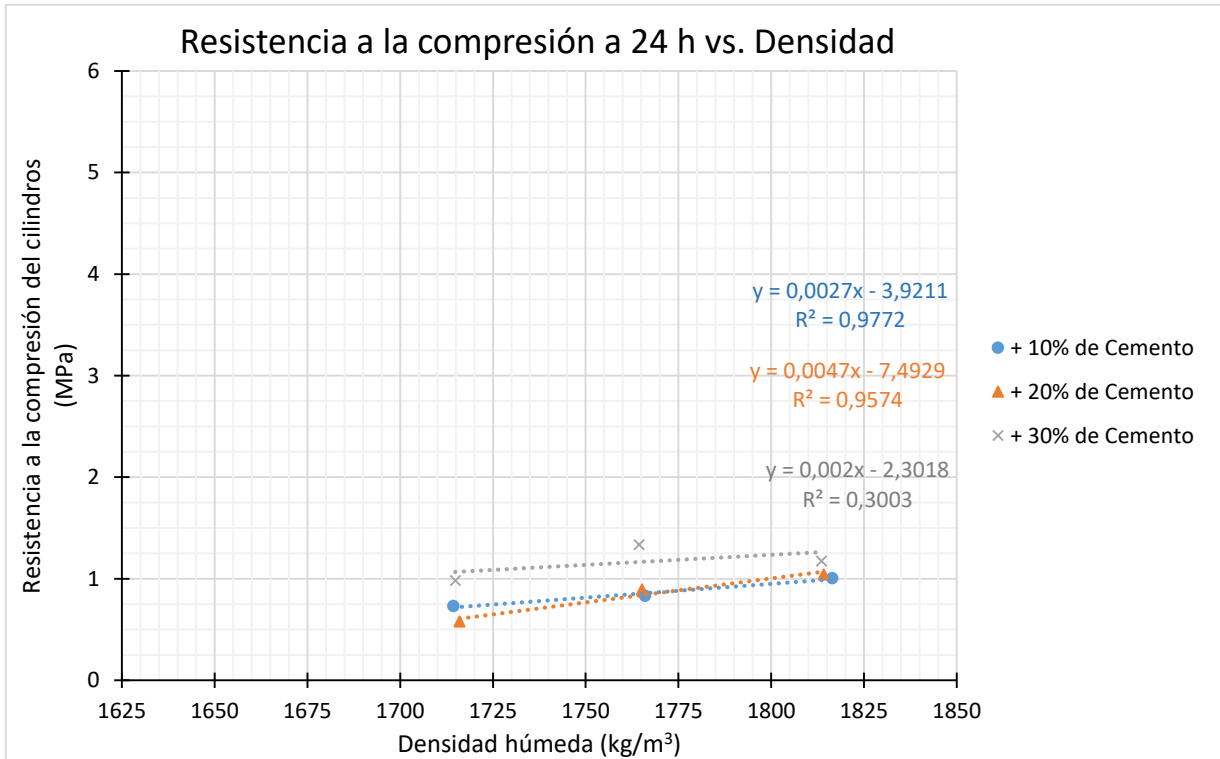
*Ilustración 60. Textura superficial en cilindro vs. bloque*



Fuente: Elaboración propia, 2017



Gráfico 12. Resistencia a la compresión de los cilindros con EPS a 24 horas vs. densidad húmeda



Fuente: Elaboración propia, 2017

En el gráfico 13 se puede apreciar como la densidad del concreto se mantuvo dentro de un mismo rango para cada una de las diferentes masas (máxima, media y mínima) con diferentes porcentajes de cemento en los cilindros.

#### 4.5.2 Ensayos de los especímenes de 5 cm x 10 cm utilizando cemento UG-AR y poliestireno expandido

A continuación, se presenta el proceso experimental de los ensayos realizados a 24 horas de los cilindros de 5 cm x 10 cm para la verificación de la resistencia a la compresión, utilizando cemento UG-AR, en esta sección se presentan dos estudios con el mismo cemento, debido a que se realizó otro diseño de verificación, a diferencia que al segundo diseño se le realizó corrección por humedad en los agregados.

Tabla 30. Resumen de los datos obtenidos en los cilindros con cemento UG-AR

<b>+10% de Cemento UG-AR</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,35 %	1814	0,73
24 horas	Med	355	6,27 %	1765	0,70
24 horas	Min	345	6,34 %	1714	0,69
<b>+20% de Cemento UG-AR</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,12 %	1814	0,99
24 horas	Med	355	6,15 %	1765	0,94
24 horas	Min	345	6,16 %	1715	0,76
<b>+30% de Cemento UG-AR</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,18 %	1814	0,94
24 horas	Med	355	6,19 %	1765	0,83
24 horas	Min	345	6,15 %	1715	0,74

Fuente: Elaboración propia, 2017

Tabla 31. Resumen de los datos obtenidos en los cilindros de realizados con cemento UG-AR, corrección por humedad

<b>+10% de Cemento UG-AR Corrección %W</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,24 %	1815	0,58
24 horas	Med	355	6,27 %	1765	0,79
24 horas	Min	345	6,32 %	1715	0,57
<b>+20% de Cemento UG-AR Corrección %W</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,20 %	1815	0,85
24 horas	Med	355	6,21 %	1765	0,85
24 horas	Min	345	6,19 %	1715	0,52
<b>+30% de Cemento UG-AR Corrección %W</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,23 %	1814	1,11
24 horas	Med	355	6,24 %	1765	1,00
24 horas	Min	345	6,26 %	1715	0,67

Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 61. Ensayo a compresión de cilindro con EPS y cemento UG-AR*



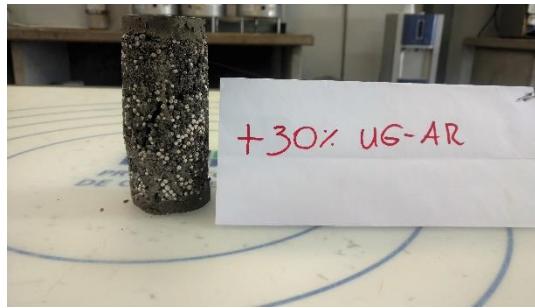
Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 62. Ensayo a la compresión de cilindros con 30% más de cemento UG-AR*



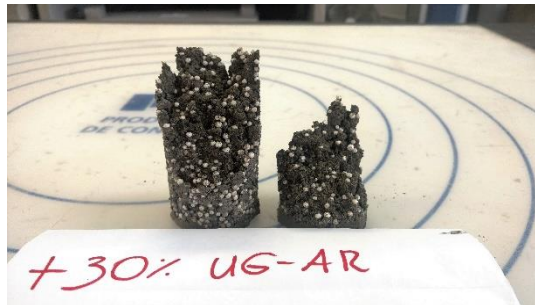
Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 63. Ensayo a compresión de cilindros*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 64. Ensayo a compresión de cilindro con cemento UG-AR*



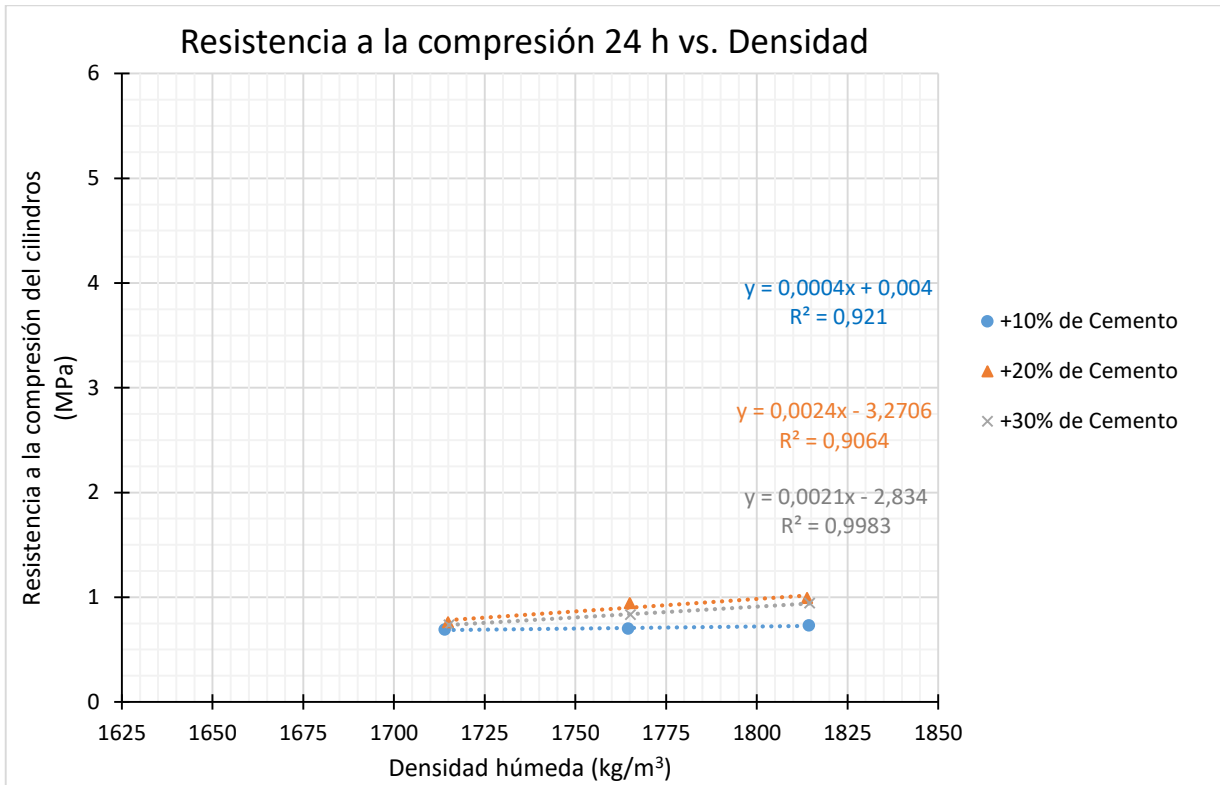
Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 65. Textura superficial de cilindro con cemento UG-AR vs. bloque*



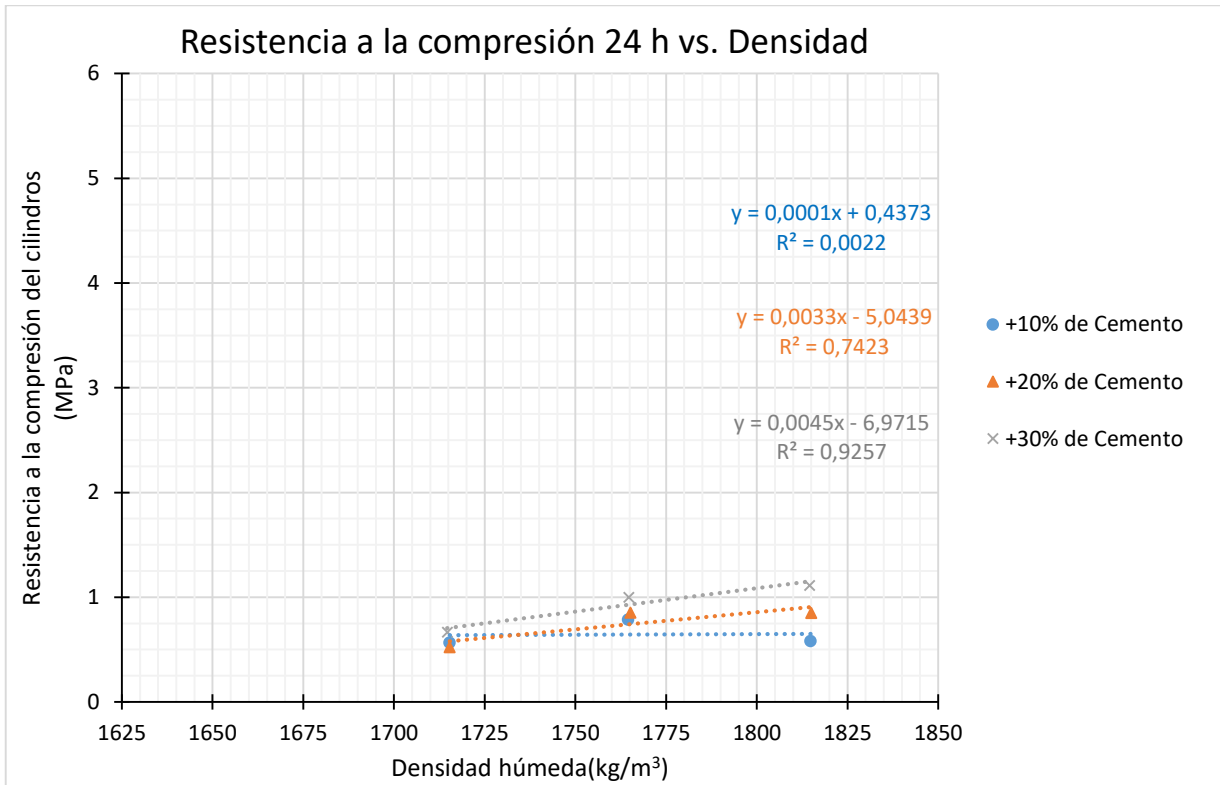
Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 13. Resistencia a la compresión de los cilindros con EPS a 24 horas vs. densidad húmeda (Cemento UG-AR)



Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 14. Resistencia a la compresión de los cilindros con EPS a 24 horas vs. densidad húmeda (Cemento UG-AR, Corrección %W)



Fuente: Elaboración propia, 2017

#### 4.5.3 Comparación de los resultados obtenidos de la sección 4.5.1 y 4.5.2

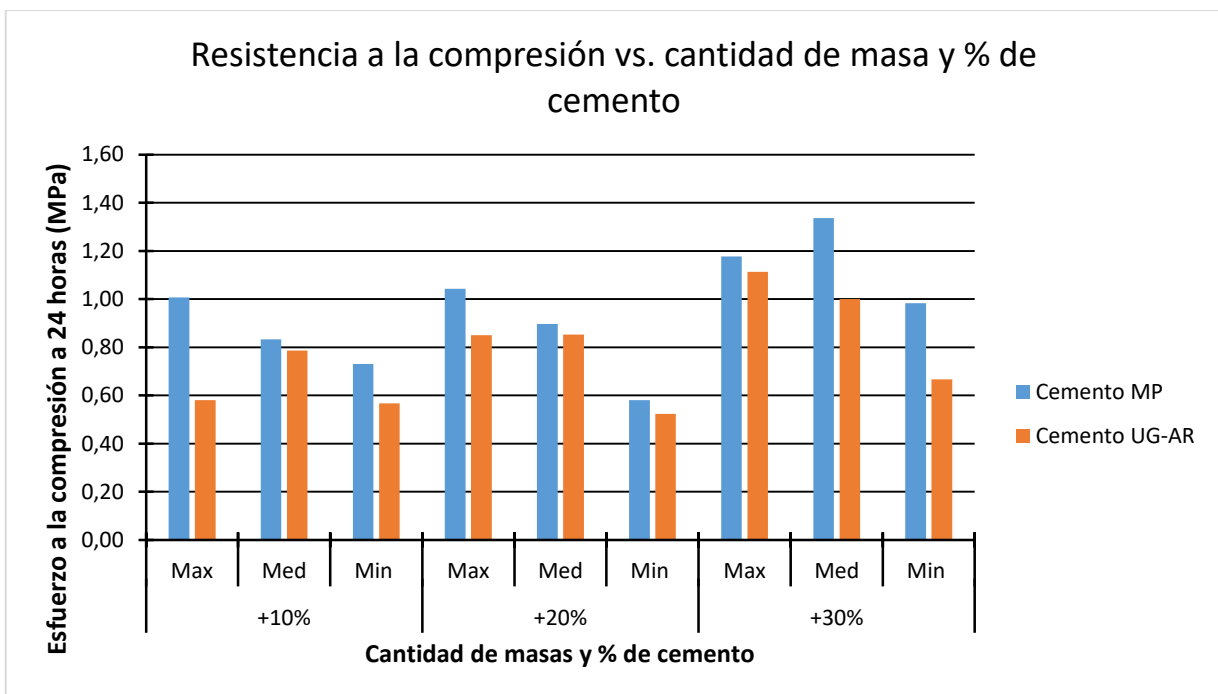
Como se mencionó en la sección 4.4 se va a tomar el diseño que haya arrojado mejor resultado en la resistencia a la compresión de los especímenes fallados a 24 horas, con el fin de sustituir el EPS inicial por Politerm, EPS con aditivo para obtener una mejor adherencia entre las partículas de EPS con el concreto.

Tabla 32. Esfuerzos obtenidos con diferentes tipos de cementos

Tabla resumen			
		MP	UG-AR
% de cemento	Cant. Masa	Esfuerzo a 24 horas (MPa)	Esfuerzo a 24 horas (MPa)
+10%	Max	1,01	0,58
	Med	0,83	0,79
	Min	0,73	0,57
+20%	Max	1,04	0,85
	Med	0,90	0,85
	Min	0,58	0,52
+30%	Max	1,18	1,11
	Med	1,34	1,00
	Min	0,98	0,67

Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 15. Comparación de resultados de resistencia a compresión con diferentes cementos



Fuente: Elaboración propia, 2017

Como se puede observar en la gráfica 16, haciendo un promedio en cada uno de los resultados obtenidos, se puede afirmar que el diseño con mejor resultados fue el que se realizó con 30% más de cemento MP, por lo tanto, este es el que se elige para sustituir el EPS convencional por el EPS-Politerm y posteriormente agregarle aditivo acelerante de resistencia.

#### 4.5.4 Ensayos de los especímenes de 5 cm x 10 cm utilizando cemento MP y poliestireno expandido Politerm + aditivo acelerante de resistencia

En este apartado se estudiarán dos diseños de mezcla, el primero será el realizado con Politerm, y el segundo será el mismo diseño a diferencia que se le agregará un aditivo acelerante de la resistencia. A continuación, se presentan las tablas con los datos obtenidos por este estudio, el cual, al igual que los anteriores, se realizaron a 24 horas.

Tabla 33. Resumen de los datos obtenidos en los cilindros con cemento MP y Politerm

<b>+10% Cemento MP Politerm</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,23 %	1839	0,93
24 horas	Med	355	6,22 %	1790	0,86
24 horas	Min	345	6,20 %	1739	0,81
<b>+20% Cemento MP Politerm</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,25 %	1840	0,99
24 horas	Med	355	6,22 %	1789	0,71
24 horas	Min	345	6,23 %	1740	0,58
<b>+30% Cemento MP Politerm</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,20 %	1839	1,05
24 horas	Med	355	6,24 %	1789	0,98
24 horas	Min	345	6,22 %	1739	0,95

Fuente: Elaboración propia, 2017

Tabla 34 . Resumen de los datos obtenidos en los cilindros con cemento MP y Politerm + aditivo

<b>+10% de Cemento</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,23 %	1839	0,91
24 horas	Med	355	6,21 %	1790	0,93
24 horas	Min	345	6,23 %	1740	0,73
<b>+20% de Cemento</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,18 %	1840	0,95
24 horas	Med	355	6,13 %	1789	0,89
24 horas	Min	345	6,21 %	1740	0,73
<b>+30% de Cemento</b>					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,24 %	1839	1,17
24 horas	Med	355	6,20 %	1790	1,13
24 horas	Min	345	6,18 %	1741	0,98



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 66. Cilindros con Politerm*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 67. Cilindro con Politerm*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 68. Cilindro con Politerm + aditivo acelerante de resistencia*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 69. Ensayo de resistencia a la compresión mediante prensa hidráulica*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 70. Ensayo de resistencia a la compresión en cilindro con Politerm*



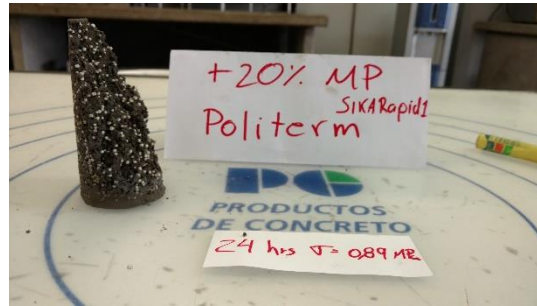
Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 71. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindro con Politerm*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 72. Ensayo de resistencia a la compresión en cilindro con Politerm + aditivo acelerante*



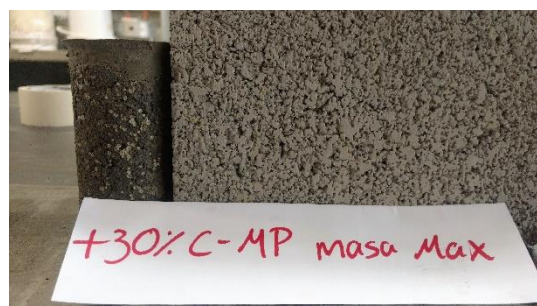
Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 73. Textura superficial en cilindro con Politerm vs. bloque*



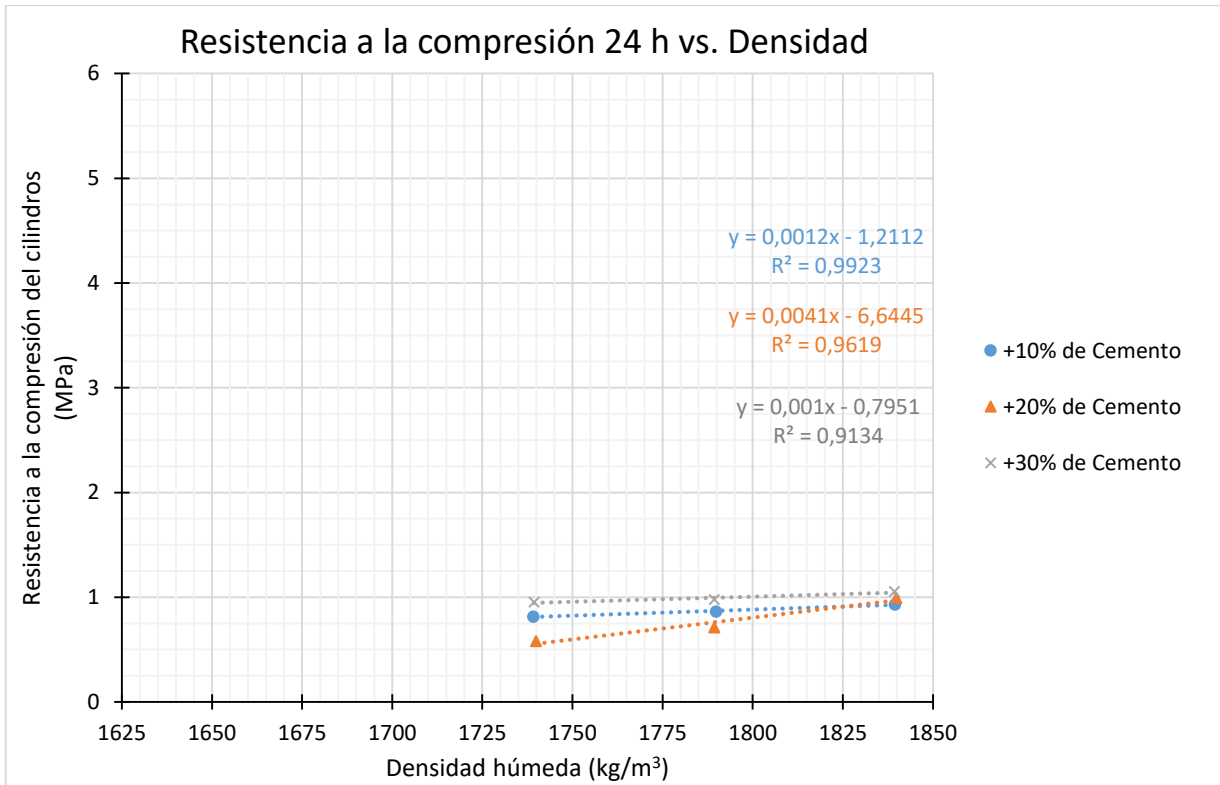
Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 74. Textura superficial en cilindro con Politerm vs. bloque*



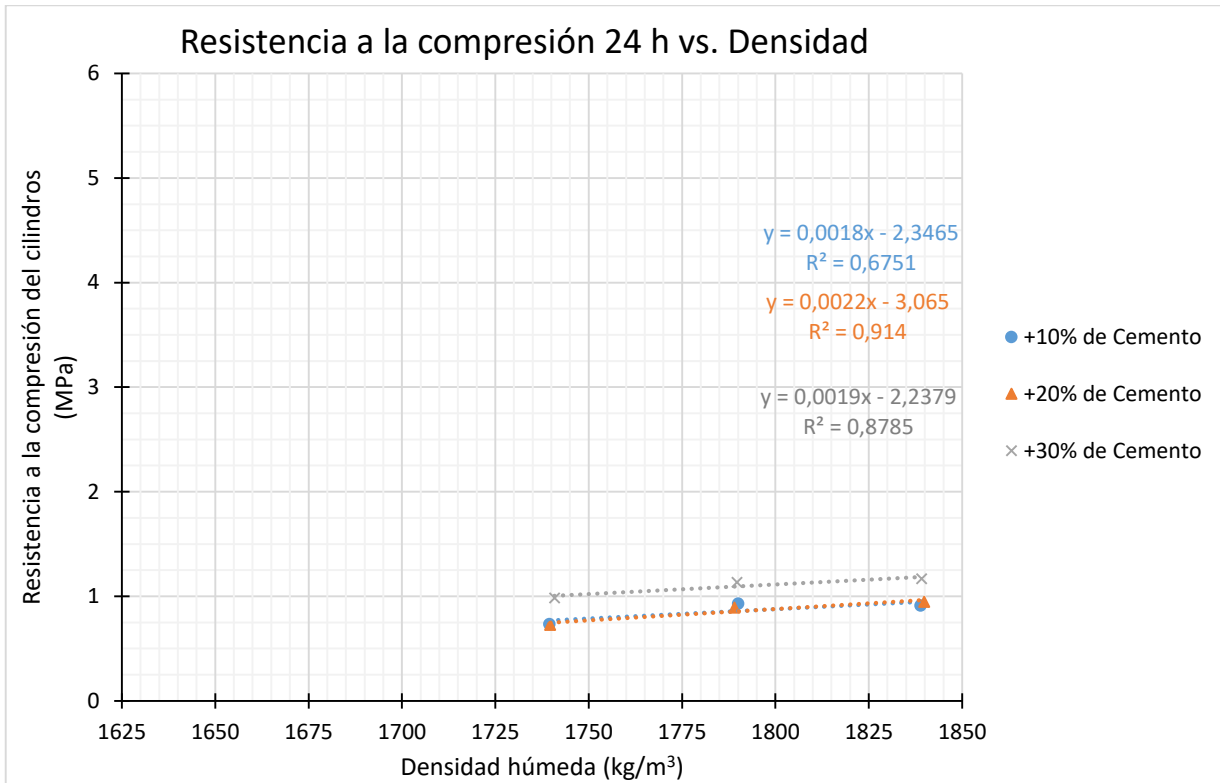
Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 16. Resistencia a la compresión de los cilindros con Politerm a 24 horas vs. densidad húmeda



Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 17. Resistencia a la compresión de los cilindros con Politerm + aditivo acelerante de las resistencias a 24 horas vs. densidad húmeda



Fuente: Elaboración propia, 2017

#### 4.5.5 Selección del diseño con EPS que arrojó los mejores resultados de resistencia a la compresión

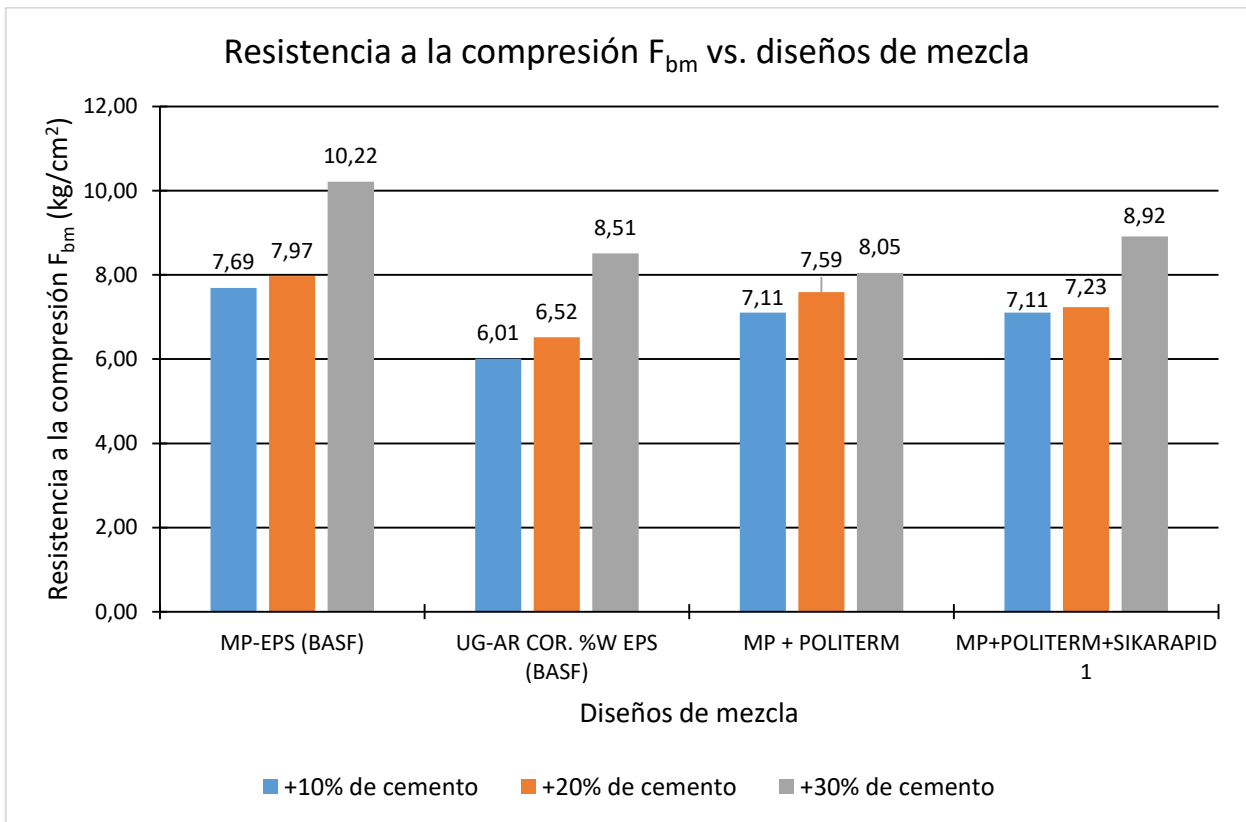
Con el fin de obtener el mejor diseño de mezcla liviana con poliestireno expandido como agregado no convencional, se realiza la recopilación de los datos de todos los ensayos en los cuales se tomó el valor máximo de cada uno de ellos y se convirtió a la resistencia a la compresión promedio de los bloques de concreto a una edad dada  $F_{bm}$ , mediante la ecuación 12 expuesta en el capítulo 2, sección 2.12.5 del presente trabajo de investigación.

Tabla 35. Resistencia a la compresión  $F_{bm}$  a 24 horas de los especímenes con EPS

Tabla resumen de resistencia a la compresión $F_{bm}$ a las 24 horas				
% Cemento	MP-EPS (BASF) (kg/cm <sup>2</sup> )	UG-AR COR. %W EPS (BASF) (kg/cm <sup>2</sup> )	MP + POLITERM (kg/cm <sup>2</sup> )	MP+POLITERM+ SIKARAPID 1 (kg/cm <sup>2</sup> )
+10%	7,69	6,01	7,11	7,11
+20%	7,97	6,52	7,59	7,23
+30%	10,22	8,51	8,05	8,92
Mayor	10,22	8,51	8,05	8,92
Menor	7,69	6,01	7,11	7,11

Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 18. Resistencia a la compresión  $F_{bm}$  vs. diseño de mezcla



Fuente: Elaboración propia, 2017

Conforme lo indicado en la gráfica 19 se determina que el diseño de mezcla con EPS que arrojó mejor resultado es el que se realiza con 30% más de cemento MP y con el EPS convencional (BASF). Por lo tanto, se realizará un set completo de cilindros de 5 cm x 10 cm para hacerle todo el estudio mencionado en el capítulo 2 sección 2.12 de presente documento.

#### 4.5.6 Diseño seleccionado de mezcla liviana con adición de EPS

En este apartado se realizará el estudio completo propuesto en el capítulo 2 (sección 2.12 Método de diseño de mezclas de concreto para mampostería estructural propuesto por Frasson Jr) donde se evaluará la resistencia a la compresión de los especímenes de 5 cm x 10 cm, la cohesión, densidad seca y textura superficial.

*Tabla 36. Diseño con mejor resultado de resistencia a la compresión de mezcla con EPS*

Tabla resumen de mejor diseño EPS (BASF)								
Cant. Masa	Masa húmeda (g)	Humedad (%)	Cohesión (kg)	Resist. Comp. 24 h (MPa)	Resist. Comp. 7 días (MPa)	Resist. Comp. 28 días (MPa)	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad húmeda (kg/m <sup>3</sup> )
Máx	365,3	6,18 %	0	1,16	2,43	5,32	1770	1897
Med	355,3	6,21 %	0	1,03	2,00	4,35	1680	1797
Mín	345,4	6,17 %	0	0,91	1,69	3,94	1652	1776

Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 75. Ensayo a la compresión del espécimen en prensa hidráulica*



Fuente: Elaboración propia, 2017



Ilustración 76. Ensayo a la compresión en cilindros con EPS a 24 horas



Fuente: Elaboración propia, 2017

Ilustración 77. Ensayo a la compresión en cilindro con EPS a los 7 días



Fuente: Elaboración propia, 2017

Ilustración 78. Ensayo a la compresión en cilindro con EPS a los 28 días



Fuente: Elaboración propia, 2017



*Ilustración 79. Ensayo de cohesión a cilindros con EPS*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 80. Ensayo de cohesión a cilindros con EPS*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 81. Ensayo de cohesión a cilindros con EPS*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 82. Falla por ensayo de cohesión a cilindros con EPS*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 83. Falla por ensayo de cohesión a cilindros con EPS*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 84. Textura superficial masa mínima*



Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 85. Textura superficial masa media*



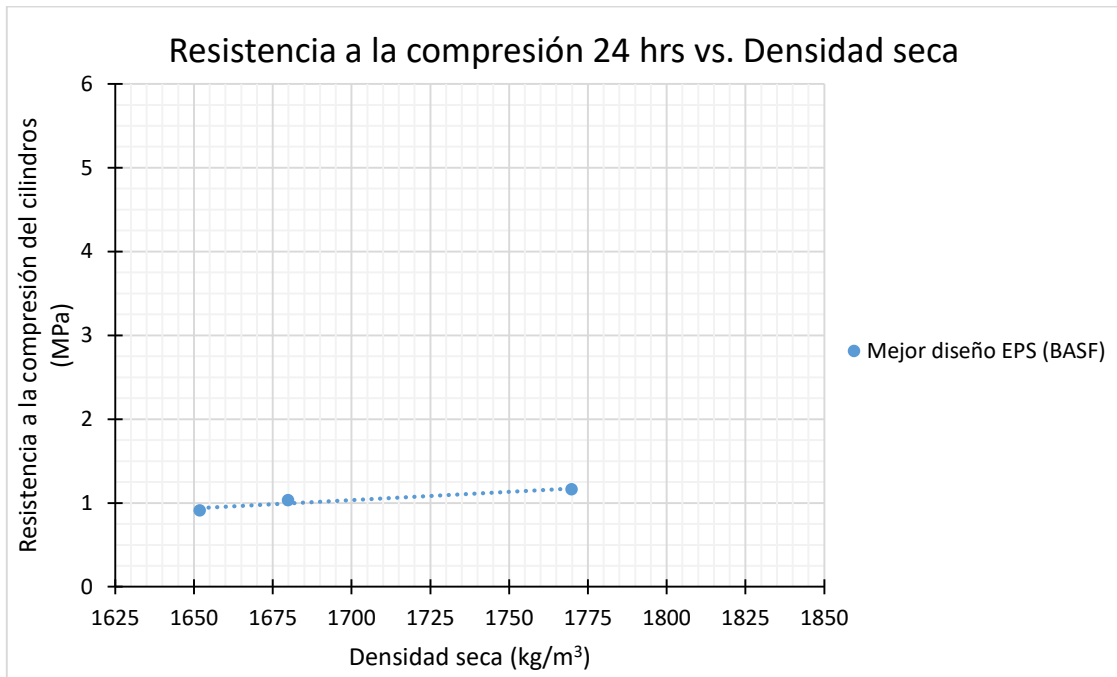
Fuente: Elaboración propia, 2017

*Ilustración 86. Textura superficial masa máxima*



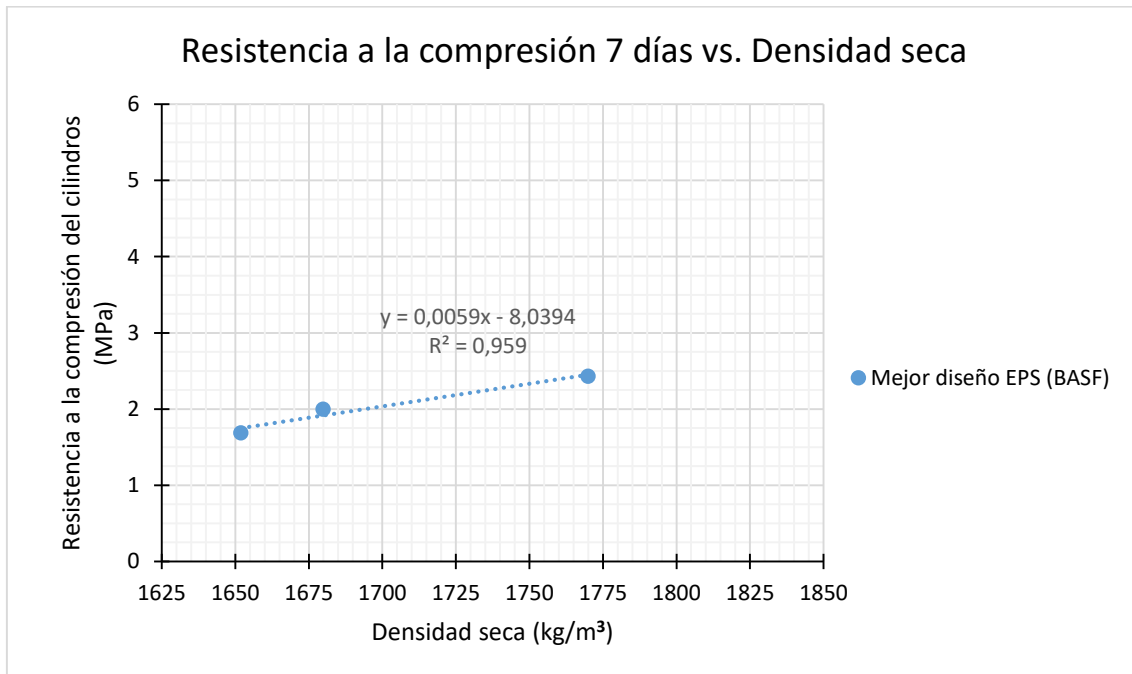
Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 19. Resistencia a la compresión a 24 horas vs. densidad seca



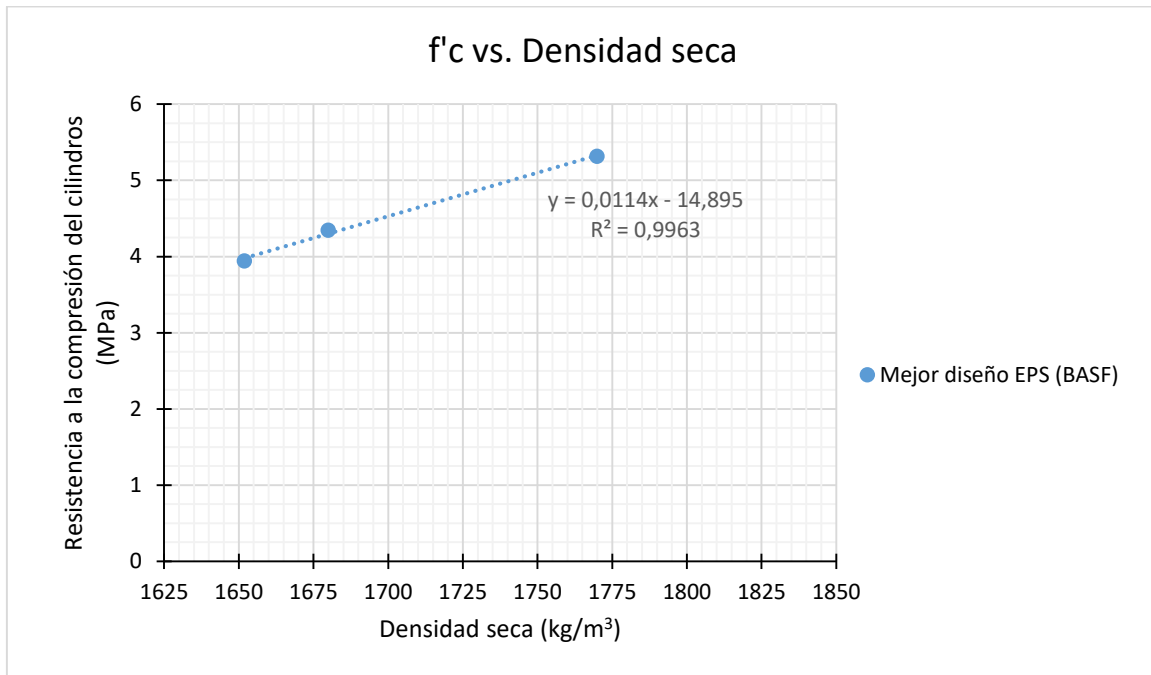
Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 20. Resistencia a la compresión a 7 días vs. densidad seca



Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 21. Resistencia a la compresión ( $f'c$ ) vs. densidad seca



Fuente: Elaboración propia, 2017

## 4.6 Análisis de los resultados

### 4.6.1 Resistencia a la compresión de los bloques ensayados

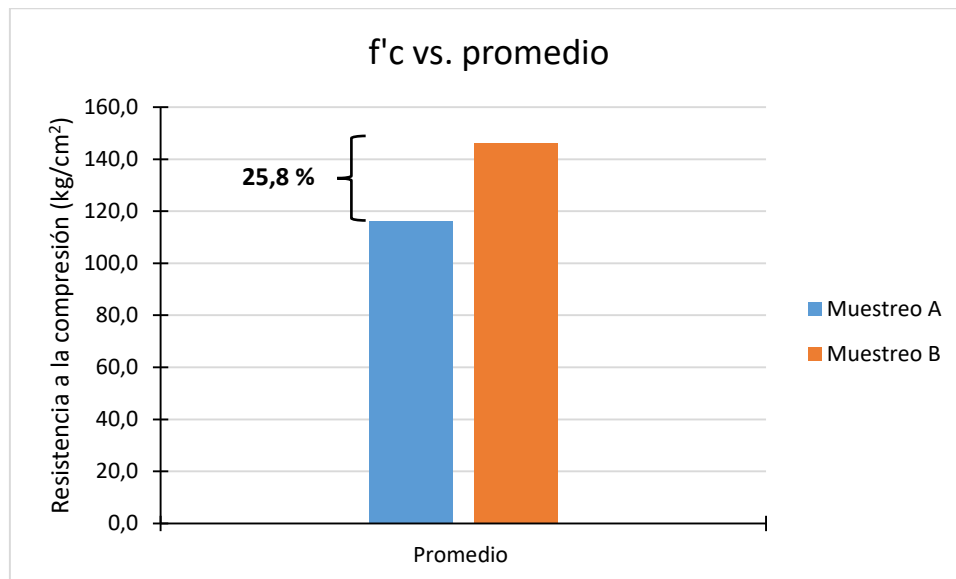
En la tabla 37 se representa el resumen de los datos obtenidos mediante el ensayo de resistencia a la compresión sobre el área neta de los elementos seleccionados, denominados (muestreo A y muestreo B), siendo el “muestreo A” de los elementos tomados de la parte exterior de la cámara húmeda, el cual se explicó en la sección 3.8.1.1 del presente proyecto de investigación. El “muestreo B” hace referencia a los bloques tomados de la parte interna de la cámara húmeda, los cuales fueron seleccionados y ensayados por los técnicos de dicha planta de producción. Es importante recalcar que tanto los bloques del “muestreo A” como los del “muestreo B”, son tomados de las mismas cámaras húmedas, con la diferencia de que se tomaron de diferentes lugares, tal como se mencionó anteriormente.

Tabla 37. Resumen de la resistencia a la compresión de los bloques ensayados

Curado inicial de los bloques de concreto en planta (cámara húmeda)				
Edad de ensayo (días)	Block	f'c Bloque muestreo A f'b (kg/cm <sup>2</sup> )	Block	f'c Bloque muestreo B f'b (kg/cm <sup>2</sup> )
28	13	111,9	706	137,5
28	14	104,9	707	152,3
28	15	92,2	708	140,7
28	16	131,8	714	155,6
28	17	121,6	715	149,5
28	18	135,5	716	142,4
<b>Promedio</b>		<b>116,3</b>		<b>146,3</b>
<b>Máximo</b>		<b>135,5</b>		<b>155,6</b>
<b>Mínimo</b>		<b>92,2</b>		<b>137,5</b>

Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 22. Resistencia a la compresión promedio de los bloques ensayados (muestreo A y B)



Fuente: Elaboración propia, 2017

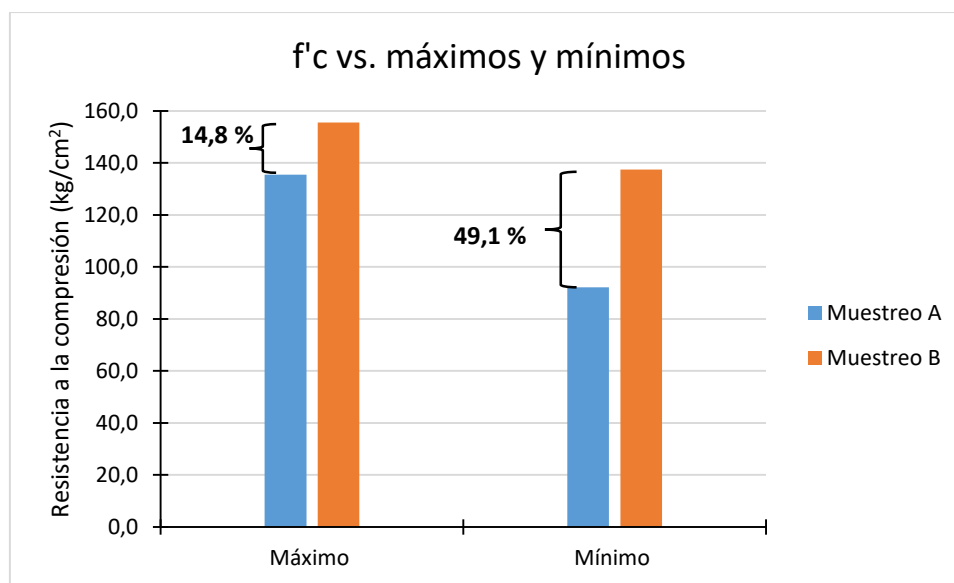
La gráfica 23 muestra una importante diferencia en los resultados obtenidos con respecto a los bloques ensayados, como se mencionó anteriormente los elementos fueron tomados directamente de la cámara húmeda que se encuentra en la planta de producción denominada (MASA), con la diferencia de que los elementos fueron tomados de distintos lugares, como se mencionó en el capítulo 3 (sección 3.8.1.1). Los bloques con menor

resistencia a la compresión se tomaron de la parte exterior de la cara húmeda, la cual no cuenta con compuertas de manera tal que esta quede totalmente hermética, razón por la cual se atribuye la caída de la resistencia a la compresión de los elementos, mientras que los bloques con mayor resistencia a la compresión se tomaron de la parte interna de la cámara de curado.

Una vez más se deja en evidencia el efecto negativo de un inadecuado método de curado en el concreto, ya que la cura inicial es uno de los principales factores que componen la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto, en este caso mezclas secas.

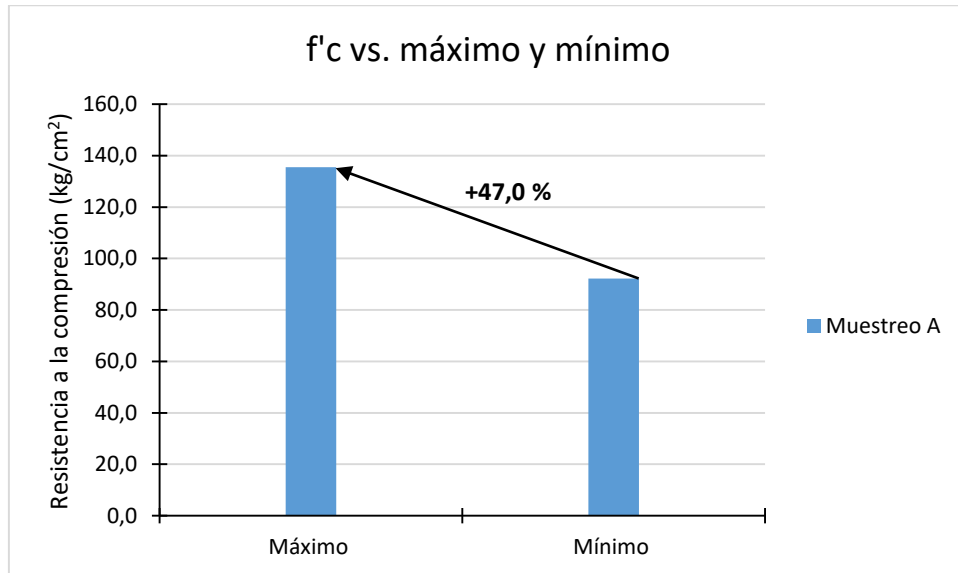
Cabe destacar que el concreto presenta la mayor resistencia a la compresión a los siete días, la literatura dice que a esta edad se puede desarrollar hasta un 70% de la resistencia a la compresión esperada del concreto, por este motivo es de suma importancia el método de cura que se le dé a los elementos los primeros siete días.

*Gráfico 23. Resistencia a la compresión máxima y mínima de los elementos ensayados (Muestreo A y Muestreo B)*



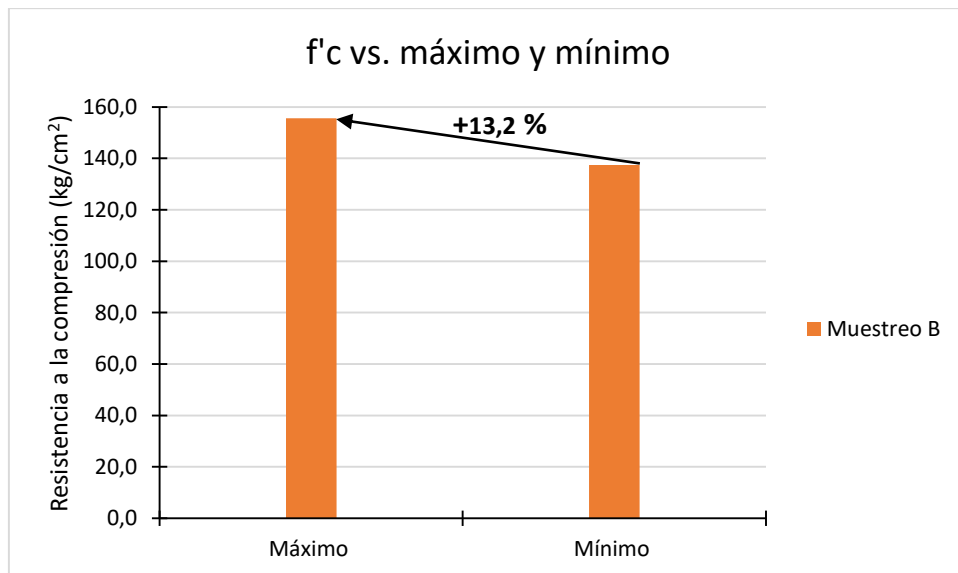
Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 24. Comparación de la mínima resistencia a la compresión con respecto a la máxima resistencia a la compresión de los bloques denominados muestreo A



Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 25. Comparación de la mínima resistencia a la compresión con respecto a la máxima resistencia a la compresión de los bloques denominados muestreo B



Fuente: Elaboración propia, 2017



De acuerdo con los gráficos 25 y 26 en los cuales se comparan la máxima resistencia a la compresión con la mínima resistencia a la compresión de los bloques denominados “muestreo A” y “muestreo B”, se puede observar una notoria diferencia en el incremento de ambas gráficas.

La gráfica 25 arroja un incremento de la resistencia a la compresión del 47%, es decir el valor máximo con respecto al mínimo muestra un incremento de 47% de la resistencia a la compresión de los bloques ensayados denominados “muestreo A”, este fenómeno es atribuible a que tres de los seis elementos ensayados, bloques 16, 17 y 18 se tomaron de la segunda paleta, la cual se encuentra más internamente con respecto a la primera paleta. Por lo tanto, los resultados de estos elementos son mayores que el resto de los elementos ensayados, dado que al estar más internos los efectos por pérdida de humedad son menores, ya que el viento y cambios de temperatura no pegan directamente sobre los elementos. Por otra parte, la gráfica 26 arroja resultados más aceptables, el incremento de la resistencia del máximo valor con respecto al mínimo valor es solo de un 13.2 %, esta variación se pueda atribuir a que el equipo de vibro-compactación utilizado no admite un llenado uniforme de los moldes, como consecuencia se presenta una mayor compactación de material en unos bloques que en otros, por lo que cierta cantidad de la mezcla es compactada por su propio peso, factor que provoca diferencias en la resistencia a la compresión de los bloques, diferencias que se encuentran entre los parámetros permisibles.

#### **4.6.2 Calibración del equipo mediante la metodología propuesta por Frasson Jr**

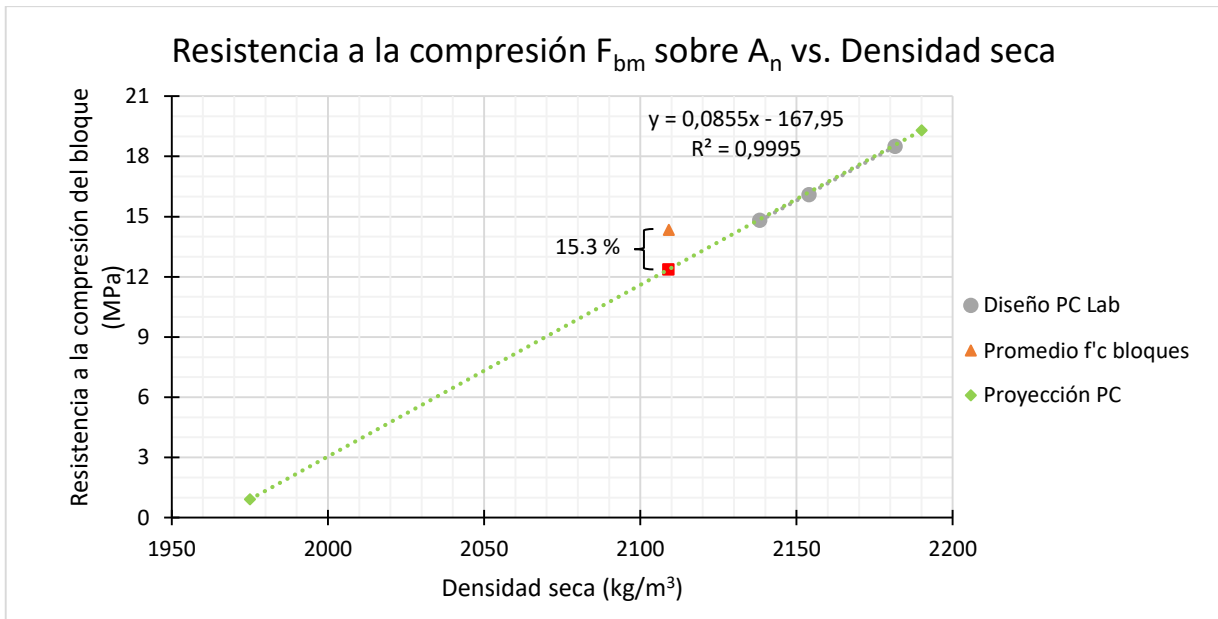
En esta sección se explicará y discutirá la manera en la que se determinó la calibración del equipo, mediante los datos recopilados en los ensayos respectivos durante el proceso experimental. Como punto de partida se tomaron los datos de los cilindros de 5 cm x 10 cm que se elaboraron con el diseño de mezcla actual de PC realizado en el laboratorio. Seguidamente se incluirán los datos denominados “Mezcla TFG”, y por último se realizará la curva de calibración con los datos denominados, “Mezcla TFG”, “Diseño PC Laboratorio” y “Diseño PC masa”.

Tabla 38. Resistencia a la compresión de  $F_{bm}$  de los cilindros de 5 cm x 10 cm

Mezclas	Cilindros	f'c (MPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Diseño PC Laboratorio	$F_{bm} =$	18,5	2181
	$F_{bm} =$	16,1	2154
	$F_{bm} =$	14,8	2138

Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 26. Calibración con los datos del diseño de mezcla PC realizado en el laboratorio



Fuente: Elaboración propia, 2017

En el gráfico 27 se puede observar como el valor de la resistencia a la compresión promedio de los bloques ensayados se encuentra un 14.4% por encima de la proyección de la curva en verde, la cual es realizada con los valores obtenidos en los ensayos a la compresión de los cilindros con el diseño de mezcla PC realizado en el laboratorio. En este caso la metodología propuesta por Frasson Jr no está siendo válida, ya que la resistencia de los bloques está por encima de la curva proyectada, lo que deja en evidencia la imposibilidad de la calibración, sin embargo, se puede concluir que este fenómeno se debe a la cantidad de masa adicionada a cada uno de los cilindros, lo que pudo haber afectado considerablemente la pendiente de la curva.

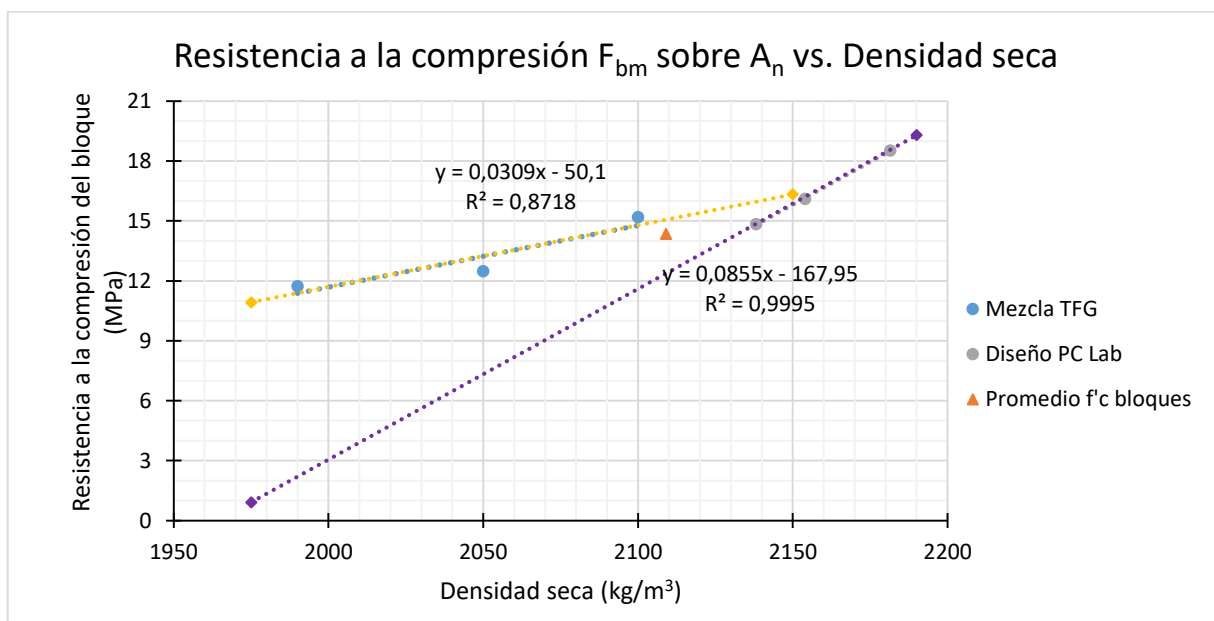
Por esta razón es que se decidió realizar una comparación con mayor cantidad de datos en resistencias a la compresión de los cilindros de 5 cm x 10 cm, así como de diferentes densidades, la comparación se realizará con los datos de la tabla 38 y datos tomados de la “Mezcla TFG” de la tesis elaborada por el ingeniero Antonio Incera Pérez (Comparación de los sistemas de curado de bloques de concreto y adaptación del método de diseño de Frasson Jr para mezclas secas) página 167.

Tabla 39. Resistencia a la compresión  $F_{bm}$  de los cilindros de 5 cm x 10 cm (Mezclas, TFG, PC Lab)

Mezclas	Cilindros	f'c (MPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Mezcla TFG	$F_{bm} =$	15,2	2100
	$F_{bm} =$	12,5	2050
	$F_{bm} =$	11,7	1990
Diseño PC Laboratorio	$F_{bm} =$	18,5	2181
	$F_{bm} =$	16,1	2154
	$F_{bm} =$	14,8	2138

Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 27. Comparación de datos  $f'c$  vs. densidad para lograr la calibración del equipo



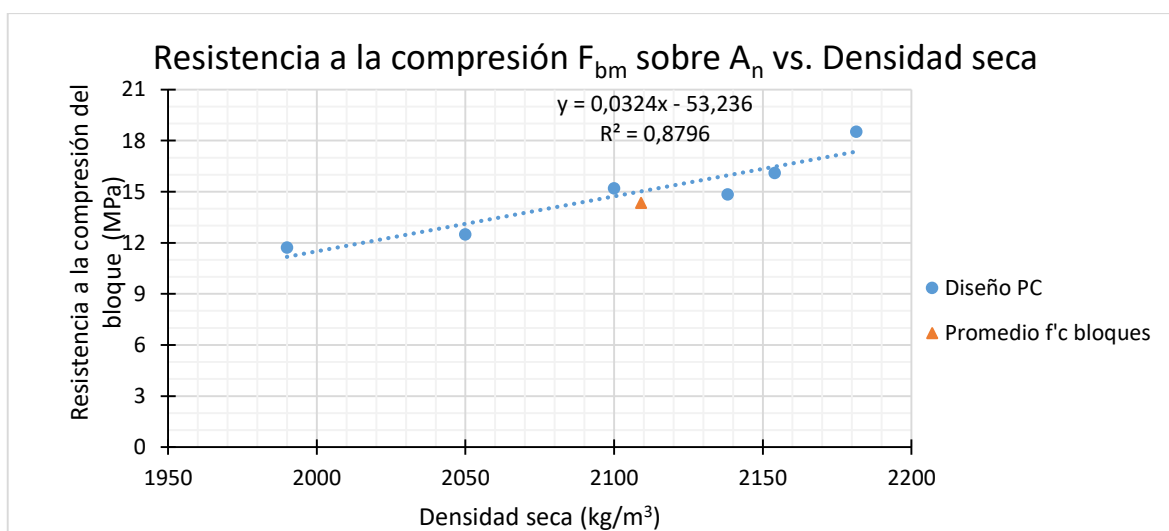
Fuente: Elaboración propia, 2017

En el gráfico 28 se trazan dos curvas, una con los datos denominados “Mezcla TFG” la cual está representada con los puntos celestes y proyección amarilla, mientras que la otra curva está representada con los puntos grises y proyección morada cuyos datos son los denominados “Diseño PC Laboratorio”, y el punto naranja representa la resistencia a la compresión promedio de los bloques ensayados.

Como se puede apreciar claramente en la gráfica 28, el punto naranja que representa la  $f'_c$  promedio de los bloques, se encuentra al medio de las dos proyecciones, por lo tanto, si se traza una curva entre todos los puntos se puede obtener una curva de calibración que cumpla con los requisitos para validar el método de Frasson Jr. Sin embargo, es importante mencionar que, para tener una mayor veracidad y confiabilidad en los datos de calibración, se recomienda realizar más especímenes con diferentes cantidades de masa, por ejemplo, elaborar cinco especímenes de 5 cm x 10 cm con diferentes cantidades de masa, aumenta de 10 g a 15 g para cada uno de ellos, de esta manera se puede obtener una curva con mayores datos, arrojando mejores resultados y mayor confiabilidad.

A continuación, en la gráfica 29 se muestra la curva entre todos los puntos anteriormente descritos. Al ver los resultados de la gráfica se puede afirmar que la metodología propuesta por Frasson Jr es aplicable y efectiva.

*Gráfico 28. Trazo de la curva de calibración entre los datos de "Mezcla TFG" y "Diseño PC Laboratorio"*



Fuente: Elaboración propia, 2017

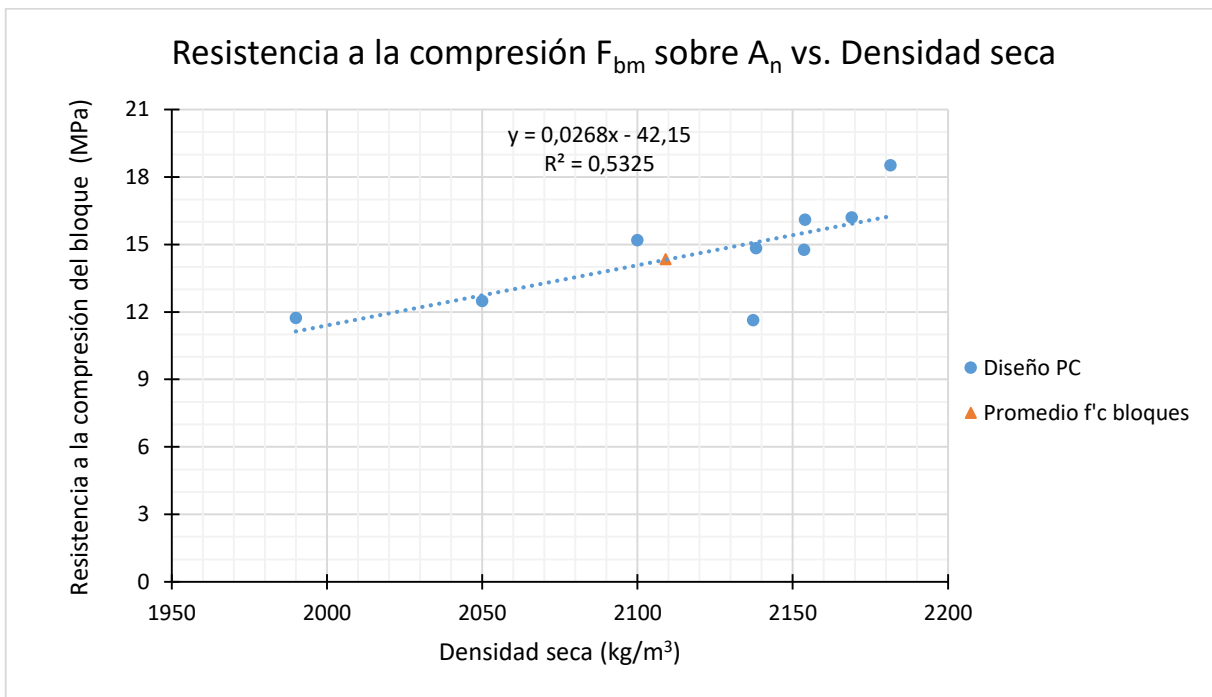
A continuación, se realizará la curva de calibración con los datos de la resistencia a la compresión  $F_{bm}$  en función del  $f_s$  de los cilindros de 5 cm x 10 cm, con los diseños de mezclas denominados “Mezcla TFG”, “Diseño PC Laboratorio” y “Diseño PC masa”.

Tabla 40. Resistencia a la compresión  $F_{bm}$  de los cilindros de 5 cm x 10 cm (Mezclas, TFG, PC Lab, PC masa)

Mezclas	Cilindros	$f'_c$ (MPa)	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )
Mezcla TFG	$F_{bm} =$	15,2	2100
	$F_{bm} =$	12,5	2050
	$F_{bm} =$	11,7	1990
Diseño PC Laboratorio	$F_{bm} =$	18,5	2181
	$F_{bm} =$	16,1	2154
	$F_{bm} =$	14,8	2138
Diseño PC masa	$F_{bm} =$	16,2	2169
	$F_{bm} =$	14,8	2154
	$F_{bm} =$	11,6	2137

Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 29. Trazo de la curva de calibración entre los datos de "Mezcla TFG", "Diseño PC Laboratorio" y "Diseño PC masa"

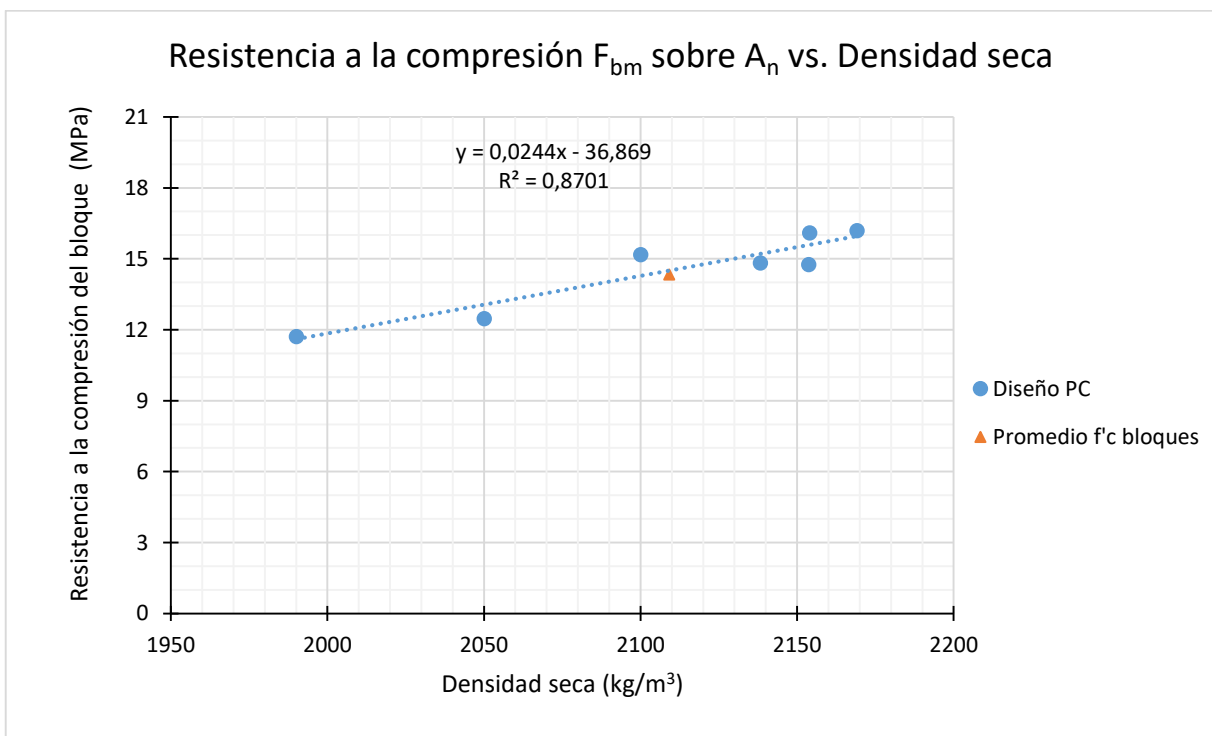


Fuente: Elaboración propia, 2017

Como se puede observar en el gráfico 30, al incluir todos los datos se logra obtener una curva la cual pasa justo por el punto naranja que representa la resistencia a la compresión promedio de los bloques, de esta manera se puede reafirmar una vez más que el método de Frasson Jr permite por medio de una curva con un diseño de mezcla preestablecido predecir la resistencia a la compresión de los bloques fabricados con las mismas características. Sin embargo, el valor de R cuadrado de la curva se encuentra muy alejado de uno, esto indica que el ajuste de la línea con los datos no es la mejor, por lo tanto, la línea de tendencia no es muy fiable.

Como se puede apreciar en el gráfico 30, existen dos puntos que se encuentran muy distantes entre sí, esto provoca una separación importante de los puntos con la curva de tendencia. Por lo tanto, se decide quitar el máximo y mínimo valor de la gráfica ya que estos no van a afectar negativamente en la configuración de la curva de mejor ajuste.

*Gráfico 30. Trazo de la curva de calibración entre los datos de "Mezcla TFG", "Diseño PC Laboratorio" y "Diseño PC masa", quitando el valor máximo y mínimo*



Fuente: Elaboración propia, 2017

Tal y como se mencionó anteriormente, en el gráfico 31 se eliminó el valor máximo y mínimo de los datos, al extraer estos datos el valor de R cuadrado mejora considerablemente mostrando un mejor ajuste en la línea de tendencia, a pesar de la eliminación de los datos la curva de calibración no se ve afectada y sigue demostrando que el método de Frasson es confiable para predecir la resistencia a la compresión de los bloques de concreto con las mismas características o similares.

#### 4.6.3 Mezclas de concreto liviano

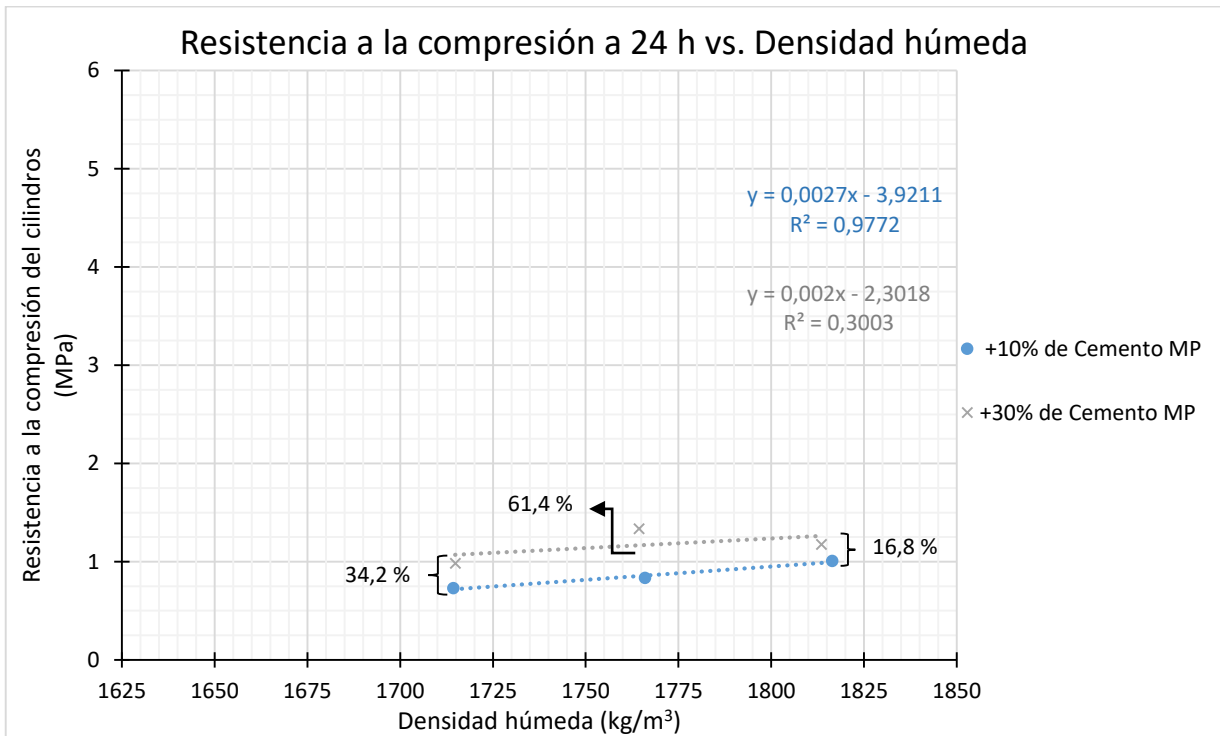
Si se toma en cuenta que el diseño de mezcla liviana da mejores resultados y que la resistencia a la compresión obtenida fue la que se realizó con poliestireno expedito (BASF), y un 30% más de cemento MP, en las gráficas 32 y 33 se realiza la comparación e influencia del porcentaje de cemento en la resistencia a la compresión de los especímenes ensayados. Tal y como es de esperarse el efecto de aumento en la resistencia a la compresión es directamente afectado por el incremento en el porcentaje del contenido de cemento en la mezcla de concreto. Sin embargo, al tratarse de una mezcla seca la resistencia a la compresión va ligada principalmente a la compactación que se le adicione al elemento.

*Tabla 41. Resumen de los datos con 10% y 30% más de cemento*

<b>+10% de Cemento MP</b>					
<b>Edad</b>	<b>Masa</b>	<b>Cant. Masa (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>
24 horas	Max	365	6,17	1816	1,01
24 horas	Med	355	6,64	1766	0,83
24 horas	Min	345	6,15	1714	0,73
<b>+30% de Cemento MP</b>					
<b>Edad</b>	<b>Masa</b>	<b>Cant. Masa (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>
24 horas	Max	365	6,36	1814	1,18
24 horas	Med	355	6,13	1764	1,34
24 horas	Min	345	6,38	1715	0,98

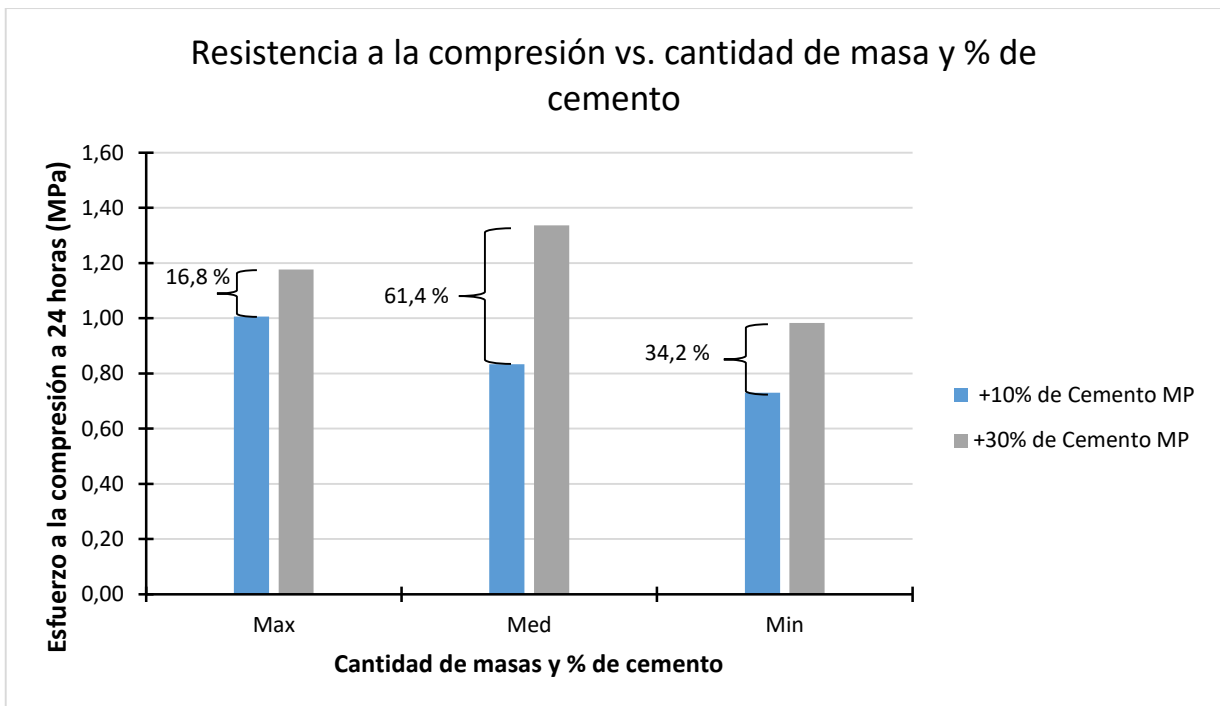
Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 31. Influencia del porcentaje de cemento en la resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 32. Influencia del porcentaje de cemento en la resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia, 2017



#### 4.6.3.1 Mezcla de concreto liviano variando tipo de cemento MP a UG-AR

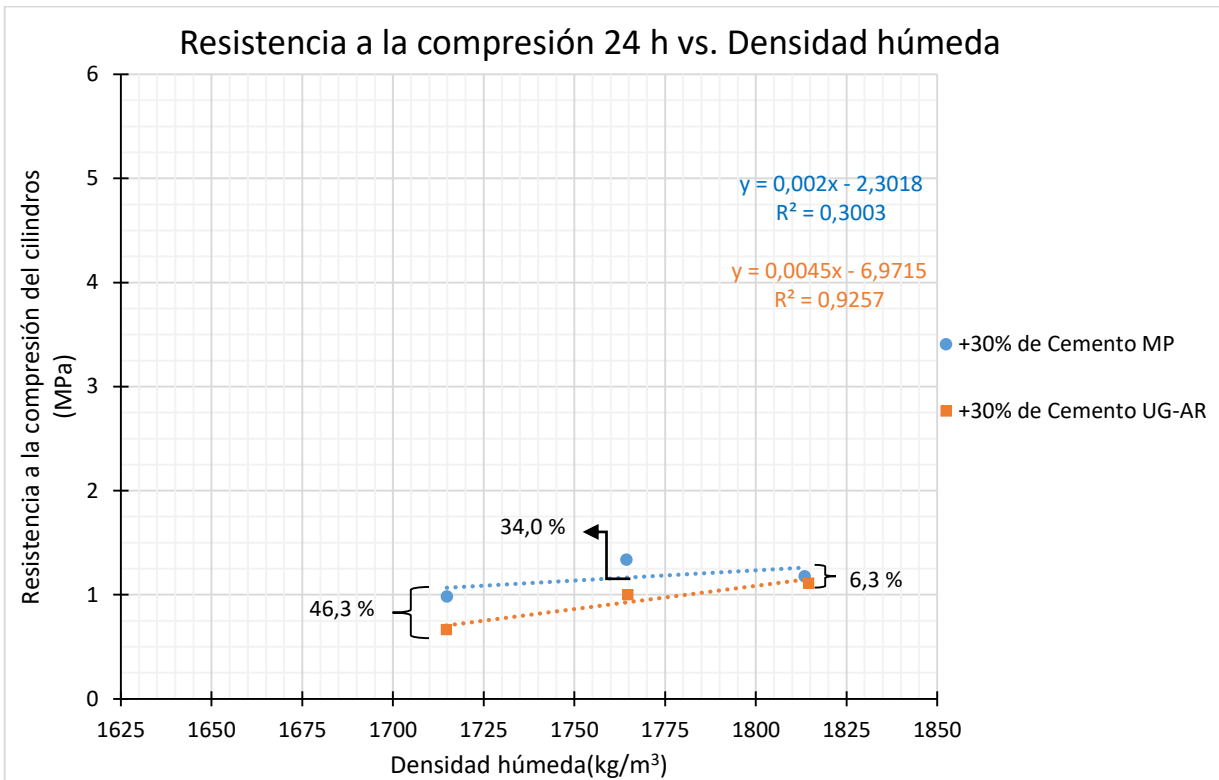
Al variar del tipo cemento MP a UG-AR se esperaría que la resistencia a la compresión incrementará considerablemente, ya que el cemento UG-AR es mucho más fino que el cemento MP, lo que genera una mayor resistencia inicial a la compresión, sin embargo, lo que muestran las gráficas 34 y 35 es completamente lo contrario a lo esperado, y es que al tratarse de una mezcla de concreto seca, la resistencia del elemento no depende primordialmente del tipo ni contenido de cemento, sino depende principalmente del empaquetamiento de las partículas y una adecuada distribución granulométrica de los agregados. Tomando en cuenta que el cemento UG-AR es tan fino, existe la posibilidad de que la curva granulométrica se seccione y no tenga continuidad con el cemento, caso contrario ocurre con el cemento MP ya que este es parcialmente más grueso y hay más cuneta con puzolana lo que contribuye a una mejor distribución granulométrica en la mezcla, por ende, una mejor distribución y empaquetamiento de las partículas, lo que beneficia a la resistencia.

*Tabla 42. Resumen con los datos de 30% más de cemento MP y UG-AR*

<b>+30% de Cemento MP</b>					
<b>Edad</b>	<b>Masa</b>	<b>Cant. Masa (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>
24 horas	Max	365	6,36	1814	1,18
24 horas	Med	355	6,13	1764	1,34
24 horas	Min	345	6,38	1715	0,98
<b>+30% de Cemento UG-AR</b>					
<b>Edad</b>	<b>Masa</b>	<b>Cant. Masa (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>
24 horas	Max	365	6,23	1814	1,11
24 horas	Med	355	6,24	1765	1,00
24 horas	Min	345	6,26	1715	0,67

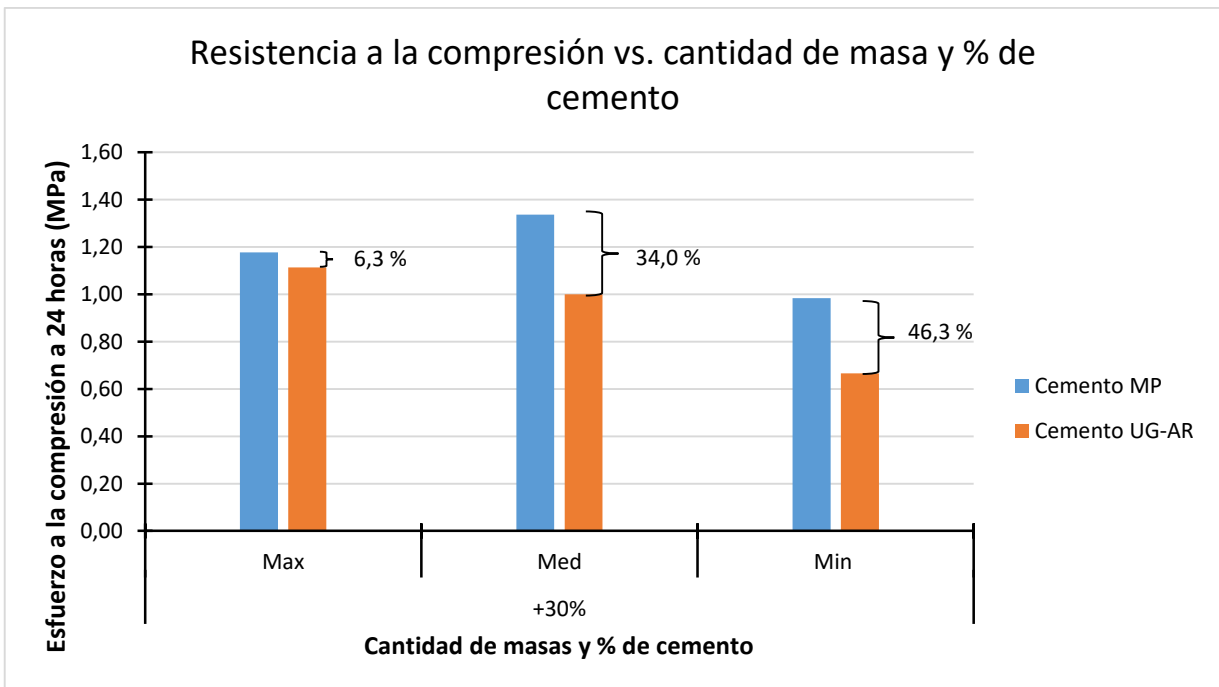
Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 33. Influencia del tipo de cemento en la resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 34. Influencia del tipo de cemento en la resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia, 2017

#### 4.6.4 Mezcla de concreto liviano sustituyendo EPS (BASF) por Politerm

En los gráficos 36 y 37 se puede observar como la incorporación del EPS Politerm, con aglutinante en las partículas para lograr una mejor homogeneidad entre las perlas de EPS con el concreto, no muestra efectos significativos en la ganancia de resistencia a la compresión, tal y como se muestra en las gráficas anteriormente mencionadas. Se puede ver claramente como el politerm no es un factor determinante en la resistencia a la compresión de los especímenes, es decir, la incorporación de un aditivo aglutinante en la esfera de EPS no es fundamental para obtener mayor resistencia a compresión en las mezclas de concreto seco.

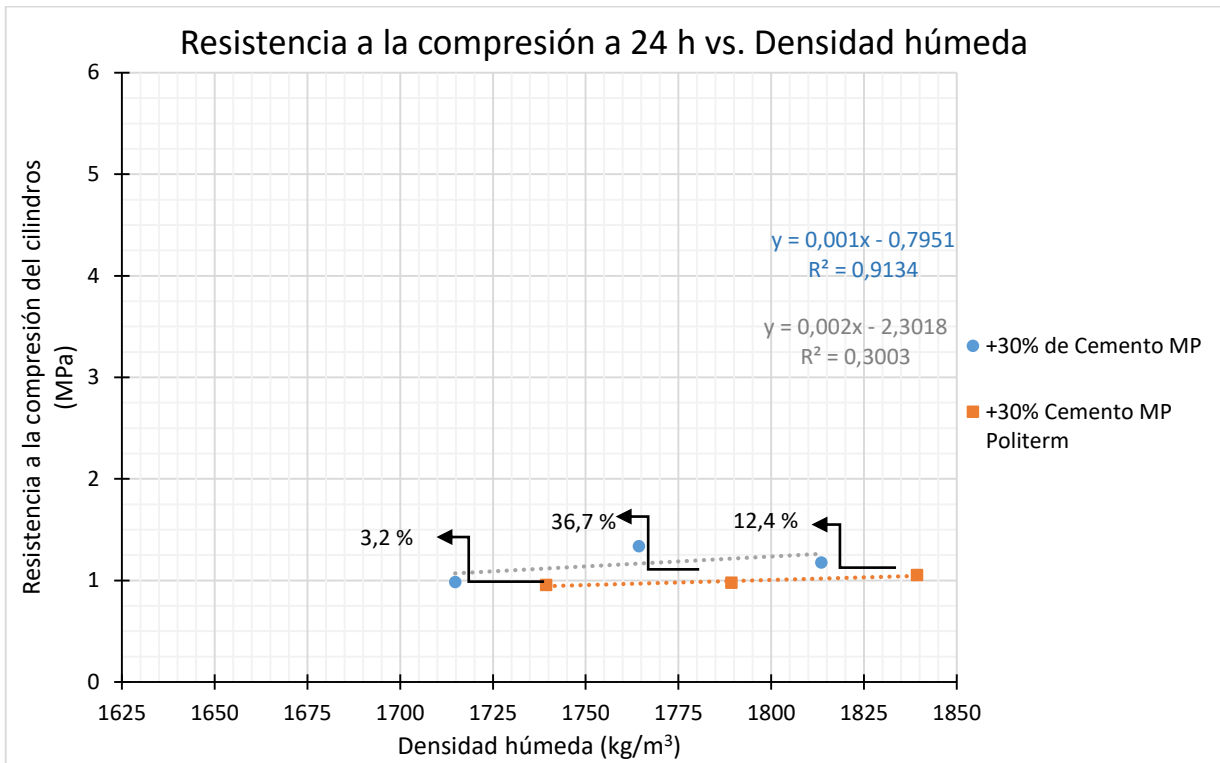
Es importante mencionar que se tomó como referencia el diseño de mezcla realizado con un 30% más de cemento MP y con poliestireno expandido (BASF), ya que este diseño es el que mejores resultados arrojó en la comparación realizada en la sección 4.6.2.1.

*Tabla 43. Resumen con datos EPS de BASF y Politerm*

<b>+30% de Cemento MP</b>					
<b>Edad</b>	<b>Masa</b>	<b>Cant. Masa (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>
24 horas	Max	365	6,36	1814	1,18
24 horas	Med	355	6,13	1764	1,34
24 horas	Min	345	6,38	1715	0,98
<b>+30% Cemento MP Politerm</b>					
<b>Edad</b>	<b>Masa</b>	<b>Cant. Masa (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>
24 horas	Max	365	6,20	1839	1,05
24 horas	Med	355	6,24	1789	0,98
24 horas	Min	345	6,22	1739	0,95

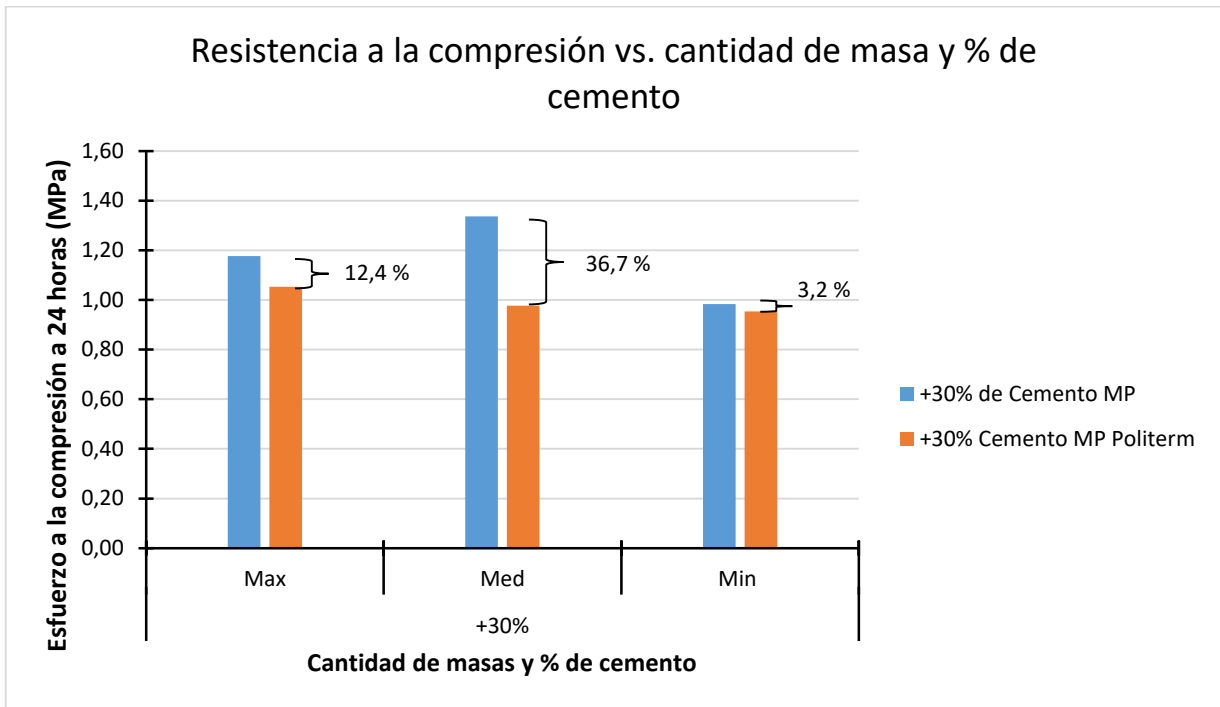
Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 35. Influencia del tipo de EPS en la resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 36. Influencia del tipo de EPS en la resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia, 2017

#### 4.6.5 Mezcla de concreto liviano con Politerm más aditivo acelerante de la resistencia

Al igual que en la sección 4.6.3 se toma como referencia el diseño de mezcla con 30% más de cemento y poliestireno expandido (BASF), ya que es el de mejores resultados de resistencia a la compresión.

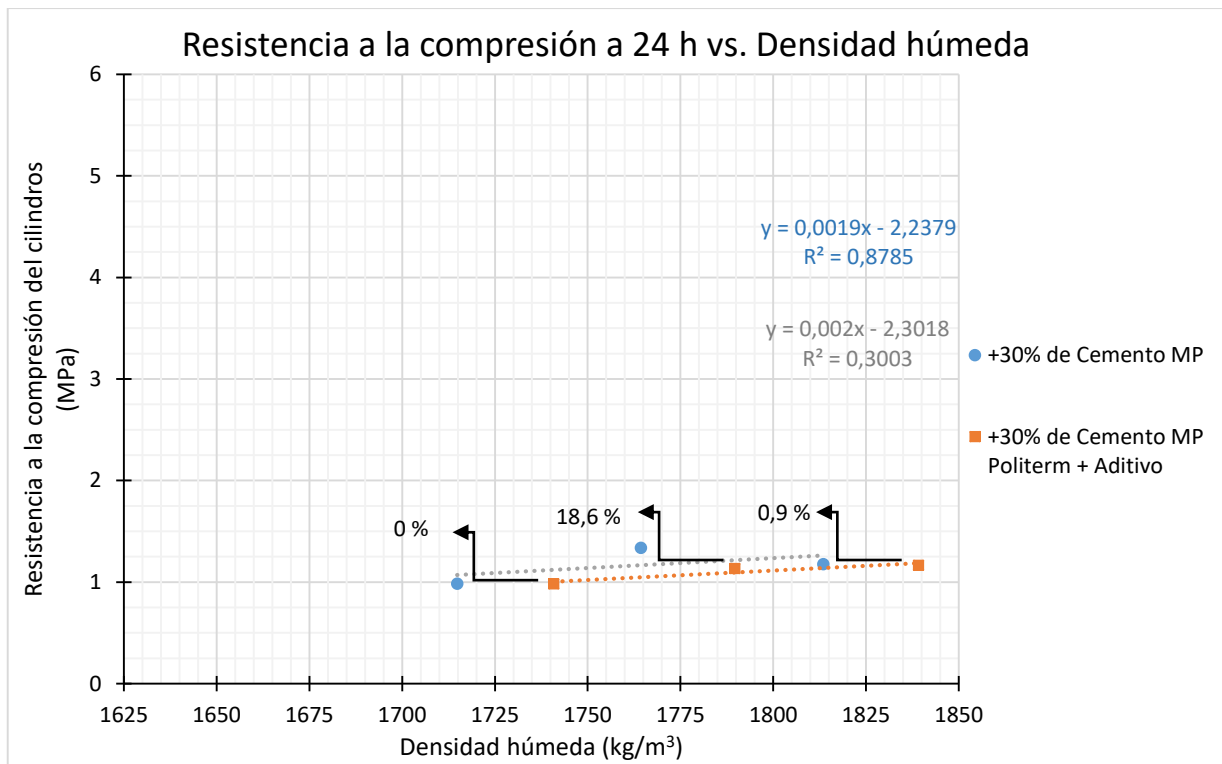
En las gráficas 38 y 39 se pone en evidencia la influencia del aditivo acelerante de la resistencia con respecto al mejor diseño de mezcla liviana obtenido, sin embargo, no se lograron resultados mayores a los obtenidos con el diseño de mezcla de referencia, por lo tanto, se desprecia el uso de aditivos acelerantes de la resistencia en las mezclas secas de concreto liviano elaboradas con poliestireno expandido.

Tabla 44. Resumen con datos EPS de BASF y Politerm + aditivo

+30% de Cemento MP					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,36	1814	1,18
24 horas	Med	355	6,13	1764	1,34
24 horas	Min	345	6,38	1715	0,98
+30% de Cemento MP Politerm + Aditivo					
Edad	Masa	Cant. Masa (g)	Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo (MPa)
24 horas	Max	365	6,24	1839	1,17
24 horas	Med	355	6,20	1790	1,13
24 horas	Min	345	6,18	1741	0,98

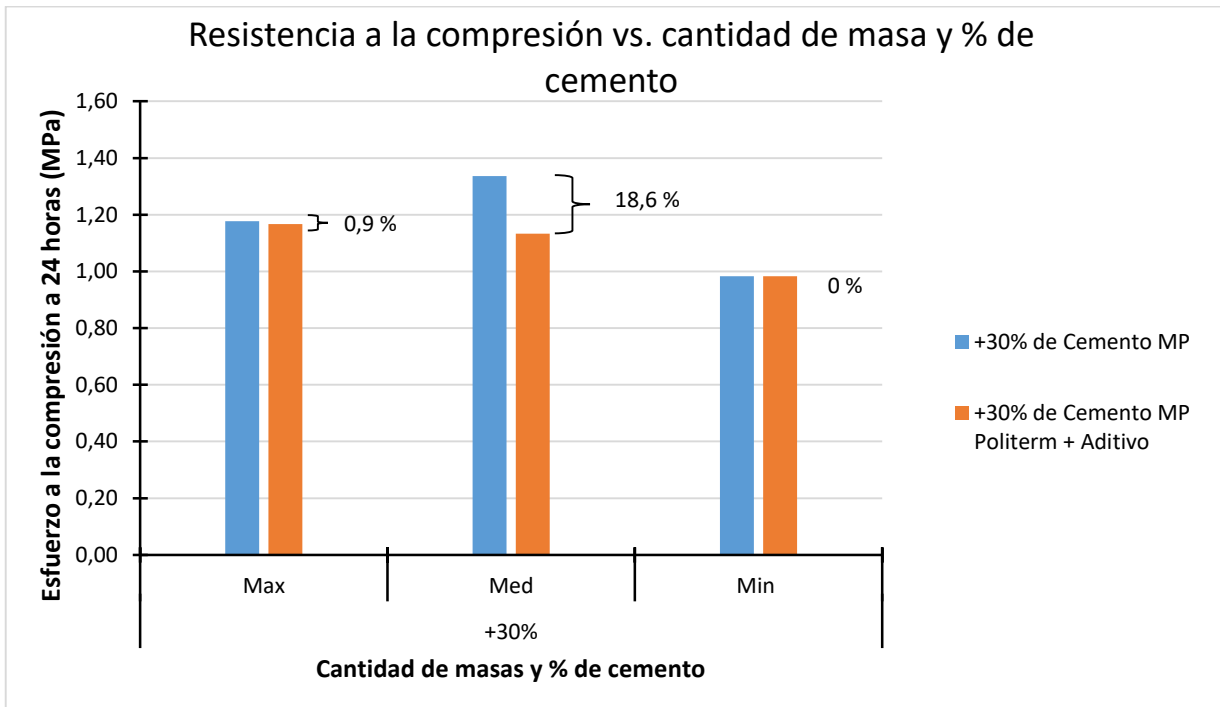
Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 37. Influencia del aditivo acelerante en la resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 38. Influencia del aditivo acelerante en la resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia, 2017

#### 4.6.6 Set completo de ensayos al diseño seleccionado de mezcla liviana con adición de EPS

En los gráficos 40 y 41 se ejemplifica de manera porcentual la ganancia de la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos que mejores resultados arrojaron. Si bien es cierto, la literatura habla de que la ganancia a la resistencia a los siete días es de aproximadamente un 70% de la resistencia a la compresión a los veintiocho días, en las gráficas anteriormente mencionadas se puede observar como el comportamiento de la resistencia no obedece al 100% a lo que se menciona en la literatura, ya que se puede observar que la ganancia de las resistencias de 24 horas a 7 días y de 7 días a 28 días en las masas máximas y media no arrojan mayor diferencia porcentual, sin embargo si se toma en cuenta la cantidad de días con respecto a la resistencia, se puede demostrar que el espécimen gana más resistencia en los primeros siete días de cura, ya que si se toma el promedio de ambas masas y se divide entre la cantidad de días se puede ver como los especímenes ensayados a 7 días ganan un 6.54 % de resistencia cada día, mientras que los especímenes ensayados a 28 días

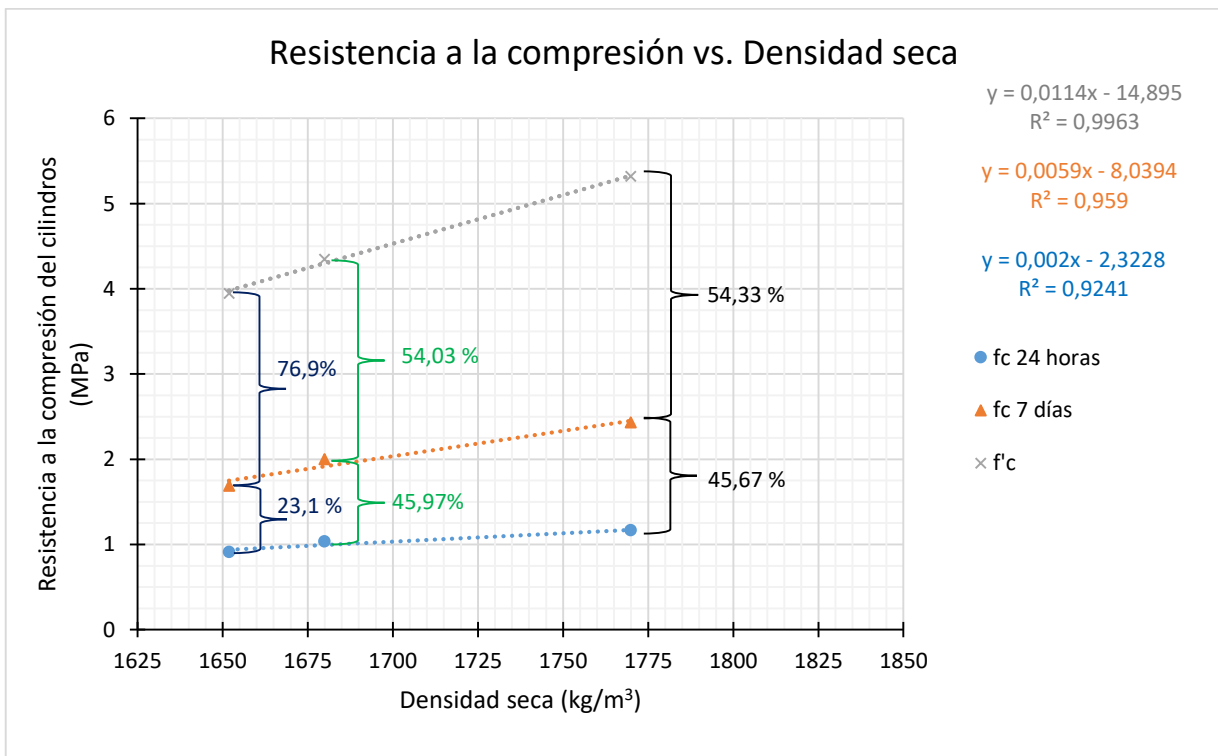
solo ganan un 1.93 % de resistencia cada día. Por otra parte, la resistencia a la compresión de la masa mínima si arroja una importante diferencia entre los porcentajes de ganancia a la resistencia, sin embargo, al dividir cada uno de estos porcentajes con los días correspondientes al ensayo se obtiene que los especímenes ensayados a siete días ganan alrededor de un 3.3% de la resistencia cada día, mientras que los especímenes ensayados a veintiocho días ganan aproximadamente un 2.7% de la resistencia cada día. Por lo tanto, una vez más queda en evidencia la importancia de realizar un adecuado curado los primeros siete días, ya que a esta edad es cuando los elementos obtienen la mayor ganancia de resistencia a la compresión.

Tabla 45. Resumen de datos del mejor diseño de mezcla seca liviana

Tabla resumen de mejor diseño EPS (BASF)							
Cant. Masa	Masa húmeda (g)	Humedad (%)	Cohesión (kg)	Resist. Comp. 24 h (MPa)	Resist. Comp. 7 días (MPa)	Resist. Comp. 28 días (MPa)	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )
Máx	365,3	6,18	0,0	1,2	2,4	5,3	1770
Med	355,3	6,21	0,0	1,0	2,0	4,3	1680
Mín	345,4	6,17	0,0	0,9	1,7	3,9	1652

Fuente: Elaboración propia, 2017

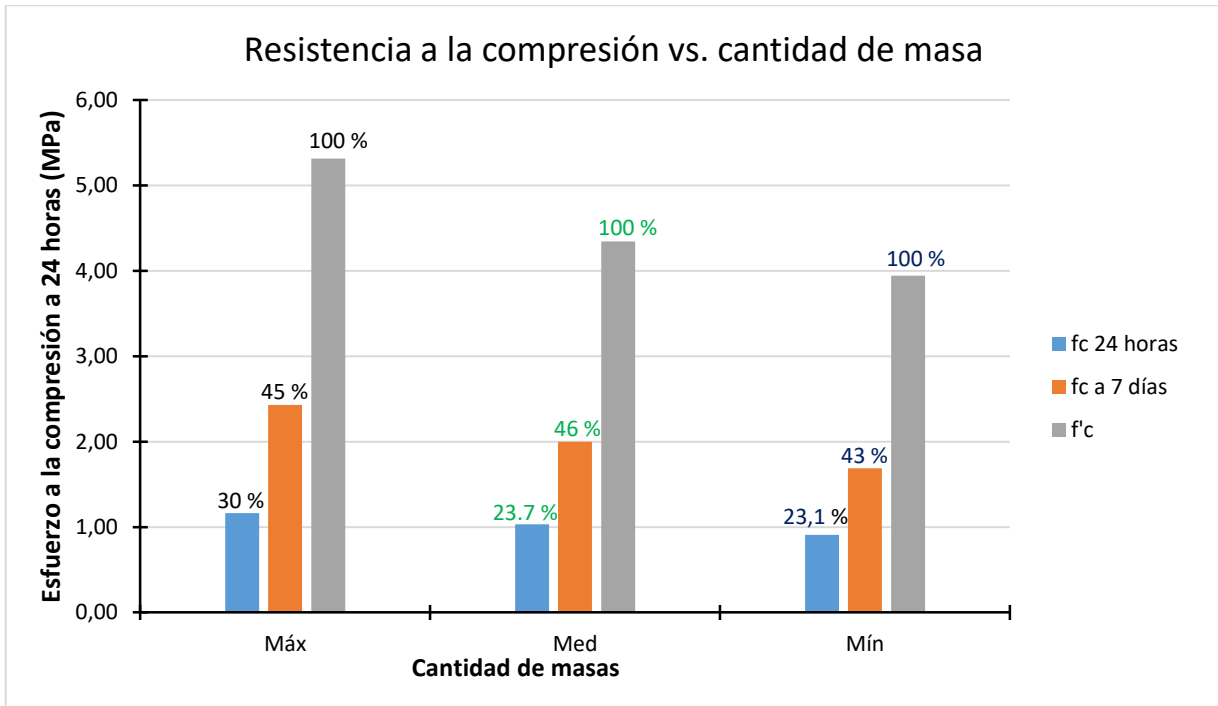
Gráfico 39. Diferencia de la resistencia a la compresión a diferentes edades.



Fuente: Elaboración propia, 2017



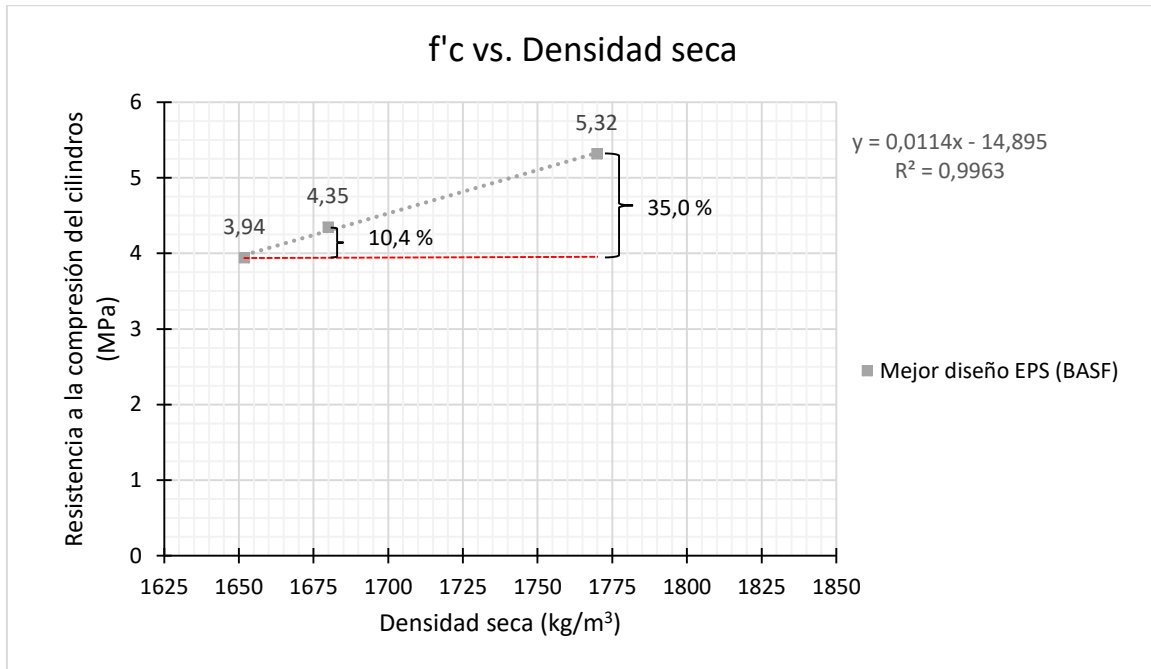
Gráfico 40. Ganancia de resistencia a la compresión con respecto a la resistencia obtenida a los 28 días.



Fuente: Elaboración propia, 2017

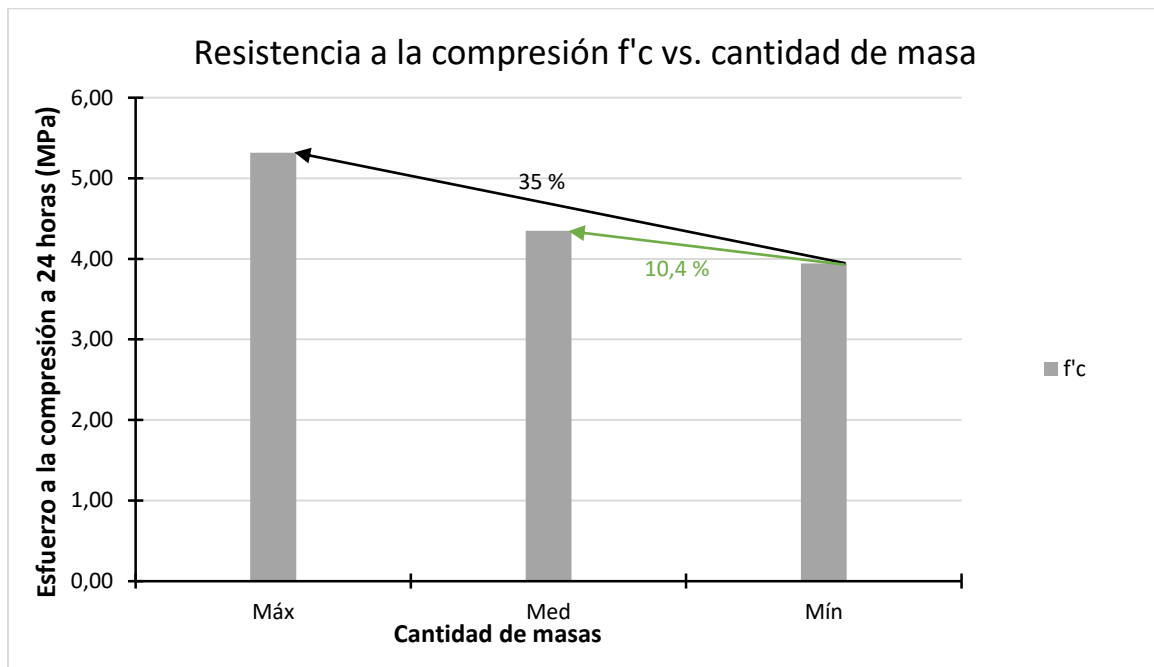
A continuación, en los gráficos 42 y 43 se puede observar claramente la influencia de la compactación en la resistencia a la compresión. Si se toma en cuenta la cantidad de masa que se adicionó a cada uno de los especímenes ensayados se puede deducir mediante la gráfica que a mayor masa mayor densidad, y por ende mayor resistencia a la compresión, es decir, al haber mayor cantidad de masa en un mismo espacio se va a requerir de mayor compactación para el acomodo de las partículas, por lo tanto, se va a lograr una mejor compactación en el elemento y por consiguiente una mayor resistencia a la compresión. Este comportamiento obedece a la teoría del concreto seco, la cual menciona que la resistencia a la compresión de los elementos fabricados con concreto seco se encuentra directamente afectada a la compactación que se le dé a dicho elemento. Esto quiere decir, que con una adecuada compactación en el elemento se va a obtener una buena resistencia a la compresión del concreto.

Gráfico 41. Diferencia de la resistencia a la compresión de la masa mínima con respecto a la masa máxima



Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 42. Diferencia de la resistencia a la compresión de la masa mínima con respecto a la masa máxima



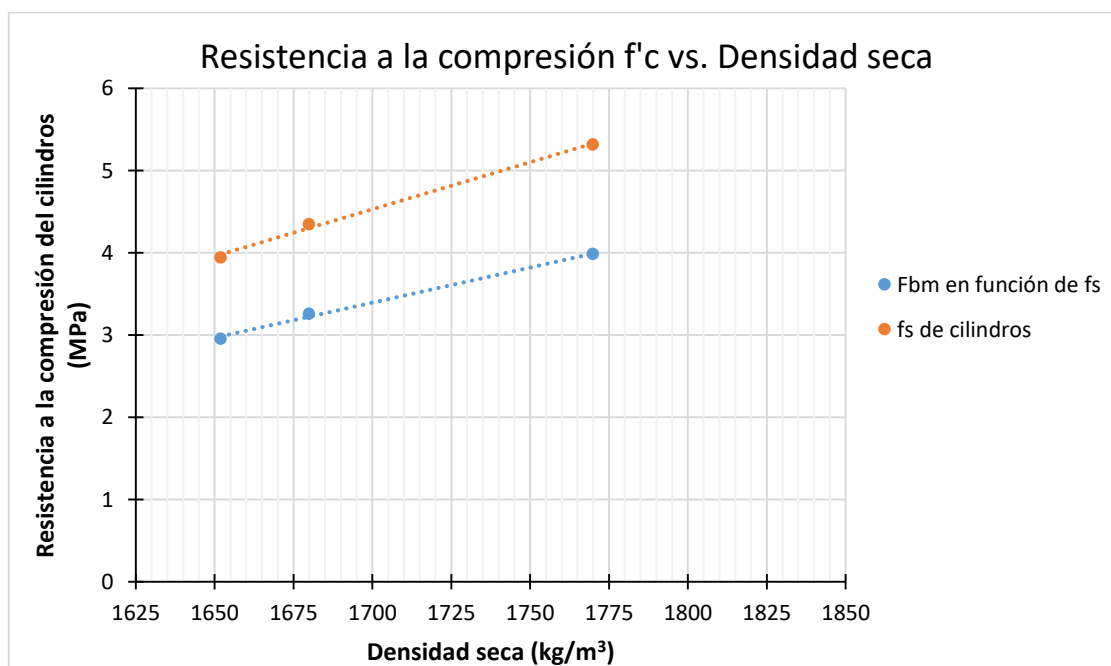
Fuente: Elaboración propia, 2017

#### 4.6.6.1 Curva de resistencia a la compresión promedio de los bloques $F_{bm}$ en función de resistencia a la compresión de los especímenes $f_s$

En el gráfico 44 se representa la predicción de la resistencia a la compresión de los bloques en función de la resistencia a la compresión de los cilindros de 5 cm x 10 cm. Como se puede observar, las tendencias de las curvas son prácticamente iguales, sin embargo, se puede ver una caída importante en la resistencia  $F_{bm}$  con respecto a la resistencia  $f_s$ , pero esto se debe a la correlación que se debe hacer para obtener los datos de  $F_{bm}$  donde existen una serie de factores de reducción, la cual se mencionó y explico en la sección 2.12.5.

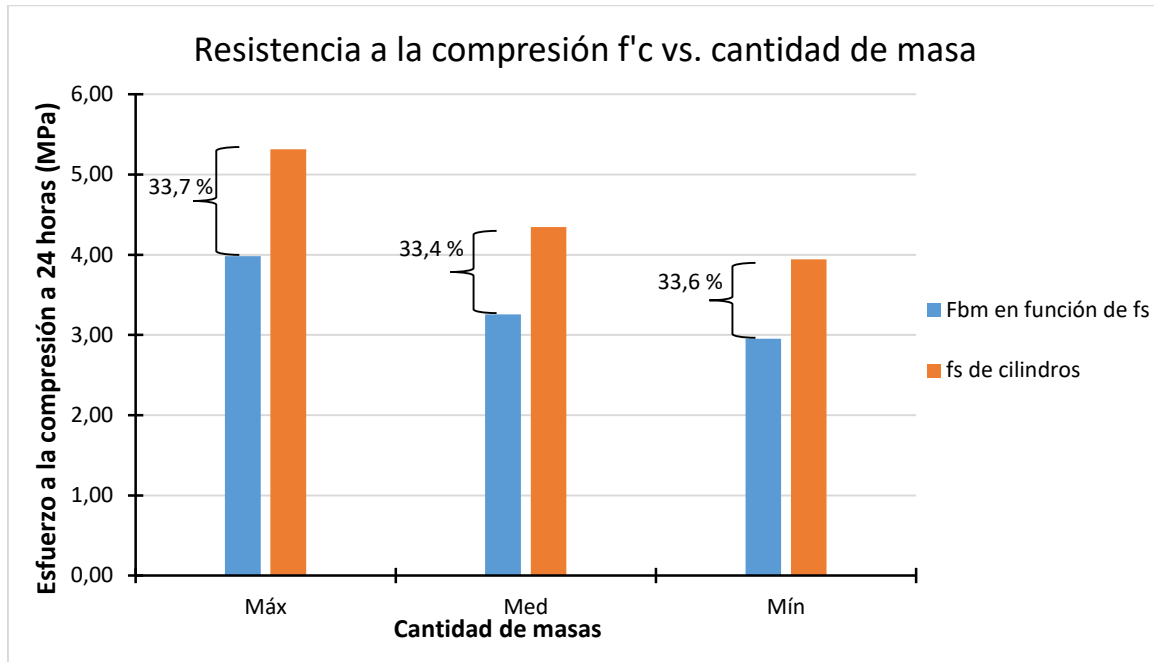
Por otra parte, el gráfico 45 muestra la diferencia porcentual que hay entre las resistencias a la compresión  $F_{bm}$  con respecto a resistencia  $f_s$ , como se puede observar dichas diferencias son prácticamente iguales, por lo tanto, se puede decir que las tendencias en las resistencias se mantienen constantes.

Gráfico 43. Resistencia a la compresión  $F_{bm}$  en función de la resistencia a la compresión de los cilindros de 5 cm x 10 cm  $f_s$



Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 44. Resistencia a la compresión  $F_{bm}$  en función de la resistencia a la compresión de los cilindros de 5 cm x 10 cm  $f_s$

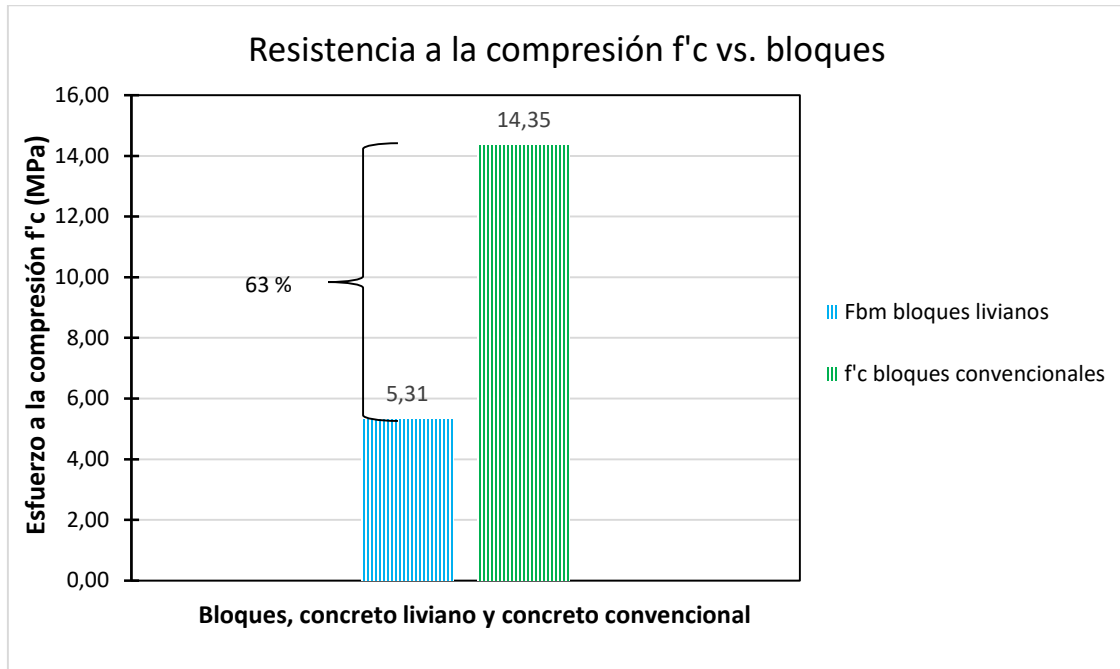


Fuente: Elaboración propia, 2017

A continuación, en el gráfico 46, se ejemplifica la diferencia que hay entre la predicción de la resistencia a la compresión  $F_{bm}$  de los bloques elaborados con la mezcla liviana, con respecto a la resistencia a la compresión de los bloques convencional realizados en la planta.

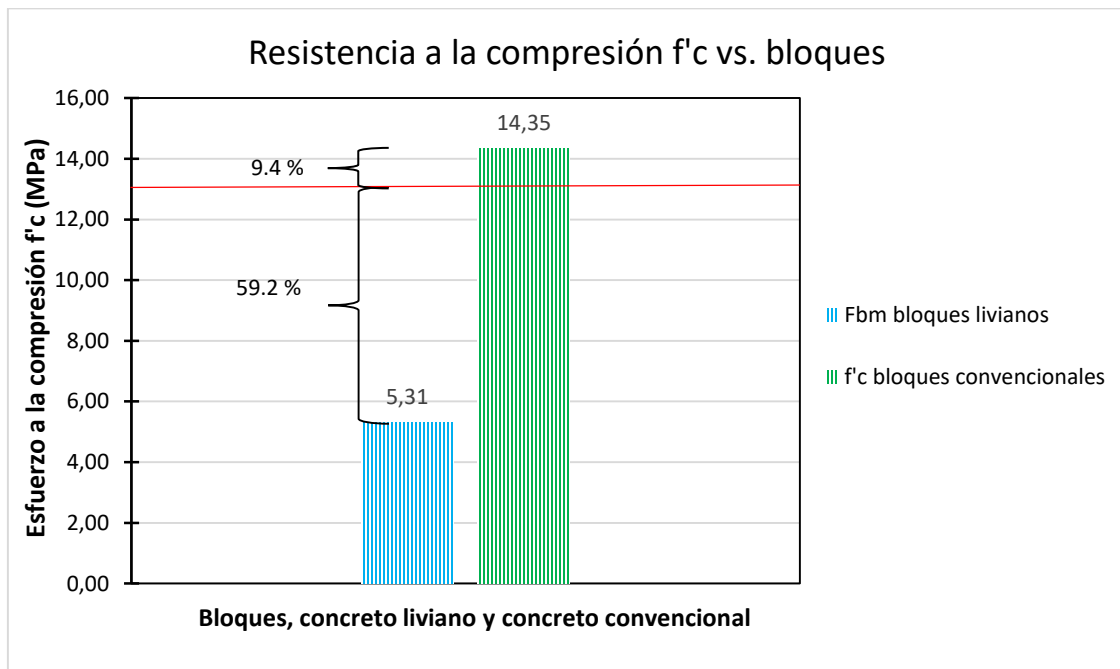
Como se puede observar la diferencia entre ambas resistencias son abismales, por lo tanto, deja en evidencia que el diseño de mezcla liviano no se puede utilizar en la fabricación de elementos de mampostería estructural, como se puede ver en la gráfica 47, la resistencia obtenida a veintiocho días en la mezcla de concreto liviano se encuentra por debajo de la resistencia requerida por el Código Sísmico de Costa Rica para bloques tipo A, en un 59.3%.

Gráfico 45. Diferencia entre la predicción de la resistencia a la compresión de los bloques livianos con respecto a los bloques convencionales



Fuente: Elaboración propia, 2017

Gráfico 46. Diferencia de la resistencia a la compresión con respecto a la resistencia mínima estipulada en el CSCR 2010 para bloques tipo A



Fuente: Elaboración propia, 2017

## CAPÍTULO 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

- Se comprobó que la resistencia de los elementos de mampostería que se encuentran en la parte exterior de la cámara de curado no cumple con los requisitos de resistencia a la compresión mínima para ser catalogado como bloque estructural tipo A, según lo indicado en el Código Sísmico de Costa Rica 2010. Por lo tanto, se determina una vez más, la importancia de un adecuado método de cura a edades tempranas.
- El método de Frasson Jr es aplicable a las mezclas secas utilizadas en la fabricación de bloques, permite la predicción de la resistencia a la compresión, cohesión del elemento, textura superficial y acabado final.
- Se aplicó una metodología experimental, la cual sirvió para determinar el comportamiento de los materiales ante diferentes dosificaciones de cemento, sustitución de tipos de cemento, sustitución de poliestireno expandido y adición de aditivo acelerante de la resistencia. Mediante estos procedimientos y los resultados obtenidos en los ensayos, se determinó el mejor diseño de mezcla seca de concreto liviano.
- El mejor diseño de mezcla seca de concreto liviano fue el que se realizó con un 30% más de cemento tipo MP, ya que por las condiciones de la mezcla desarrollada, la resistencia a la compresión no depende primordialmente de la cantidad de cemento, sino a una adecuada compactación y distribución granulométrica, efecto que permite un adecuado empaquetamiento de las partículas. El cemento MP al ser parcialmente más grueso que el UG-AR permite una continuidad de la distribución granulométrica, efecto que repercute positivamente en la resistencia a la compresión de los especímenes.
- Se determinó que el diseño de mezcla seleccionado no cumple con los requisitos para la fabricación de elementos de mampostería estructural, ya que la resistencia a esfuerzos de compresión son muy bajas con respecto a las que estipula el Código

Sísmico de Costa Rica, esto se debe a que la cantidad de masa que se le debe adicionar al elemento para obtener una densidad aproximada de  $1800 \text{ kg/m}^3$  es insuficiente, lo que provoca que no se pueda vibro-compactar lo suficiente y la resistencia a la compresión caiga considerablemente. Además, al no haber una adecuada vibro-compactación la cohesión en los elementos es prácticamente nula, efecto que imposibilita la fabricación de los elementos por desmoronamiento.

- Se determinó que el uso de EPS en la mezcla seca de concreto no es conveniente ya que no existe una reacción química entre las partículas de EPS y la mezcla de concreto, lo que provoca que la cohesión y la manipulación a edades tempranas del elemento sean prácticamente imposibles.

## **5.2 Recomendaciones**

- Efectuar una corrección en el sistema de cura en la planta de producción de Productos de Concreto, primordialmente en el exterior de las cámaras húmedas, debido a que no cuentan con compuertas y esto afecta directamente en la resistencia de los elementos que quedan en este lugar de la cámara, ya que se encuentran expuestos al aire, y cambien de temperatura constantemente.
- Se recomienda seguir con la investigación de mezclas secas livianas utilizando piedra pómez como sustituto de los agregados.
- Reducir como mínimo 15 gramos la cantidad de masa de la mezcla utilizada para cada uno de los especímenes elaborados. Ejemplo: masa máxima = 360 g, masa media = 345 g y masa mínima 330g.
- Realizar de 4 a 5 cilindros con diferentes densidades, con el fin de obtener mayor confiabilidad en los datos utilizados en la comprobación y calibración propuesto por Frasson Jr.
- Utilizar equipo de pesaje y medición con alta precisión.
- Encontrar valores en las pruebas de cohesión mayores a los 5 kg.

- Incorporar en el diseño de mezcla liviana agregado más fino, con el fin de obtener una mejor calibración granulométrica.
- Realizar un análisis variando el contenido de humedad en la mezcla, con el fin de estudiar la influencia de la humedad en los resultados de la resistencia a la compresión.



## CAPÍTULO 6. Referencia bibliográfica

### Referencia bibliográfica

- Almeida Avila , C. G. (2014). *Uso de bloques de poliestireno expandido en terraplenes* . Quito: Universidad Central del Ecuador .
- BASF. (2014). *Elaboración de Hormigón ligero a partir de Styromix*. San José: BASF.
- Buonocore, D. (1980). *DICCIONARIO DE BIBLIOTECOLOGÍA. Términos relativos a la Bibliología, Bibliografía, Bibliofilia, Biblioteconomía, Archivología, Documentología, Tipografía y materias afines*. Buenos Aires : Marymar.
- CFIA. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. San José: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Frasson Jr, A. (2000). Metodología de dosagem para blocos de concreto. *Revista Prisma*, 31-38.
- Frasson Jr, A., Casali, J., Oliveira , A., & Prudencio Jr, L. R. (2012). A MIX DESIGN METHODOLOGY FOR CONCRETE BLOCK UNITS. *15th International Brick and Block Masonry Conference*, 3.
- Garcia Pérez , J. (2004). *Universidad Politécnica de Catalunya Barcelonatech*. Obtenido de Universidad Politécnica de Catalunya Barcelonatech: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3327>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación* . México D.F: McGraw-Hill.
- Hincapié Henao, Á. M., & Montoya Góez, Y. J. (2005). La microestructura de los prefabricados del concreto. *REVISTA Universidad EAFIT*, 95.
- ICCYC. (2009). Manual de Consejos Prácticos Sobre el Concreto . *Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto* , 10 .
- INTECO. (2007). *Elementos de mampostería hueca de concreto (bloques de concreto) para uso estructural - Requisitos*. San José : INTECO.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Skokie, Illinois, USA: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.
- Lanamme/UCR. (09 de Marzo de 2017). *Laboratoria Nacional de Materiales y Modelos Estructurales*. Obtenido de Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/1-agregados/1.05.pdf>

Orozco Ronquillo , F. D. (2015). *Módulo de elasticidad estático de un panel de poliestireno expandido revestido de mortero y hormigon, reforzado con alambre galvanizado*. Quito : Universidd Central del Ecuador .

Sánchez De Guzmán, D. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero* . Santafé de Bogotá : BHANDAR EDITORES LTDA. .

## CAPÍTULO 7. Anexos

### *Anexo 1. Cálculos de absorción, densidad, volumen neto, área neta y área bruta de los elementos de mampostería*

Cálculos de elementos de mampostería según INTE C50													
Tipo de Bloque (cm)	Bloque #	Peso inicial $W_i$ (kg)	Peso sss $W_s$ (kg)	Peso sumer. $W_w$ (kg)	Peso seco $W_d$ (kg)	Absorción $kg/m^3$	% Absorción	% absorción total	Densidad $kg/m^3$	Volumen Neto $V_n$ ( $cm^3$ )	Área Neta Promedio $A_n$ ( $mm^2$ )	Área Neta $A_n$ ( $mm^2$ )	Área Bruta $A_g$ ( $mm^2$ )
12x20x40	D1	12,02	12,22	6,89	11,29	175	8,27 %	78,3 %	2117	5330	28052,63	46624,9	46800,00
12x20x40	D2	11,64	11,93	6,69	10,91	194	9,30 %	71,9 %	2082	5240	27578,95	46624,9	46800,00
12x20x40	D3	11,57	11,97	6,72	11,00	185	8,83 %	59,0 %	2095	5247	27615,79	46624,9	46800,00
12x20x41	D4	11,77	12,00	6,75	11,05	182	8,65 %	75,7 %	2103	5252	27642,11	46624,9	46800,00
12x20x40	D5	12,03	12,23	6,91	11,25	185	8,74 %	79,0 %	2112	5326	28031,58	46624,9	46800,00
Promedio =		11,80	12,07	6,79	11,10	184,08	8,76	72,81	2102,17	5279,00	27784,21	46624,92	46800,00

Fuente: Elaboración propia, 2017

### *Anexo 2. Ensayos de resistencia a la compresión sobre el área neta de los elementos de mampostería*

Ensayos de resistencia a la compresión de los bloques de concreto																																																																							
Ensayo a 24 hrs				Fecha		30/6/2017		Ensayo a 7 días				Fecha		6/7/2017		Ensayo a 28 días				Fecha		27/7/2017																																																	
Block	Tiempo de cura (Días)	Resist. Compr. ( $kg/cm^2$ )	Carga máx. (tonF)	Block	Tiempo de cura (Días)	Resist. Compr. ( $kg/cm^2$ )	Carga máx. (tonF)	Block	Tiempo de cura (Días)	Resist. Compr. ( $kg/cm^2$ )	Carga máx. (tonF)	Block	Tiempo de cura (Días)	Resist. Compr. ( $kg/cm^2$ )	Carga máx. (tonF)	Block	Tiempo de cura (Días)	Resist. Compr. ( $kg/cm^2$ )	Carga máx. (tonF)	Block	Tiempo de cura (Días)	Resist. Compr. ( $kg/cm^2$ )	Carga máx. (tonF)																																																
1	1	39,5	10,7	7	7	117,4	31,7	13	28	111,9	30,2	2	1	39,9	10,8	8	7	73,3	19,8	14	28	104,9	28,3	3	1	39,9	10,8	9	7	86,9	23,5	15	28	92,2	24,9	4	1	34,2	9,2	10	7	65,9	17,8	16	28	131,8	35,6	5	1	44,6	12,1	11	7	80,1	21,6	17	28	121,6	32,9	6	1	49,2	13,3	12	7	129,1	34,9	18	28	135,5	36,6
Promedio =				41,21		11,13		Promedio =				92,13		24,87		Promedio =				116,32		31,42																																																	

Fuente: Elaboración propia, 2017

Anexo 3. Cálculos de absorción, densidad, volumen neto y área neta de los cilindros de 5 cm x 10 cm hechos con la mezcla de PC tomada directamente de la planta

<b>Masa máxima, absorción y densidad</b>									
Masa	Cilindro	W <sub>Sumergido</sub>	W <sub>SSS</sub>	W <sub>seco</sub>	Absorción Kg/m <sup>3</sup>	Absorción %	Densidad seca Kg/m <sup>3</sup>	Volumen Neto cm <sup>2</sup>	Area Neta cm <sup>2</sup>
Max	C14	263,00	460,20	426,10	173	8,00	2161	197	20
Max	C15	263,00	458,80	425,90	168	7,72	2175	196	20
Max	C16	263,10	459,30	426,00	170	7,82	2171	196	20
Promedio =					170	7,85	2169	196	20
<b>Masa media, absorción y densidad</b>									
Masa	Cilindro	W <sub>Sumergido</sub>	W <sub>SSS</sub>	W <sub>seco</sub>	Absorción Kg/m <sup>3</sup>	Absorción %	Densidad seca Kg/m <sup>3</sup>	Volumen Neto cm <sup>2</sup>	Area Neta cm <sup>2</sup>
Med	C14	254,00	448,30	414,60	173	8,13	2134	194	19
Med	C15	258,50	450,20	417,00	173	7,96	2175	192	19
Med	C16	256,10	449,50	416,20	172	8,00	2152	193	19
Promedio =					173	8,03	2154	193	19
<b>Masa mínima, absorción y densidad</b>									
Masa	Cilindro	W <sub>Sumergido</sub>	W <sub>SSS</sub>	W <sub>seco</sub>	Absorción Kg/m <sup>3</sup>	Absorción %	Densidad seca Kg/m <sup>3</sup>	Volumen Neto cm <sup>2</sup>	Area Neta cm <sup>2</sup>
Min	C14	249,00	440,70	404,80	187	8,87	2112	192	19
Min	C15	251,50	440,40	406,60	179	8,31	2152	189	19
Min	C16	251,20	439,90	405,30	183	8,54	2148	189	19
Promedio =					183	8,57	2137	190	19

Fuente: Elaboración propia, 2017

Anexo 4. Cálculos de absorción, densidad, volumen neto y área neta de los cilindros de 5 cm x 10 cm hechos con la mezcla de PC realizada en el laboratorio

<b>Masa máxima, absorción y densidad</b>									
Masa	Cilindro	W <sub>Sumergido</sub>	W <sub>SSS</sub>	W <sub>seco</sub>	Absorción Kg/m <sup>3</sup>	Absorción %	Densidad seca Kg/m <sup>3</sup>	Volumen Neto cm <sup>2</sup>	Area Neta cm <sup>2</sup>
Max	C14	263,00	457,50	425,10	167	7,62	2186	195	19
Max	C15	264,50	460,20	425,80	176	8,08	2176	196	20
Max	C16	264,00	459,00	425,70	171	7,82	2183	195	20
Promedio =					171	7,84	2181	195	20
<b>Masa media, absorción y densidad</b>									
Masa	Cilindro	W <sub>Sumergido</sub>	W <sub>SSS</sub>	W <sub>seco</sub>	Absorción Kg/m <sup>3</sup>	Absorción %	Densidad seca Kg/m <sup>3</sup>	Volumen Neto cm <sup>2</sup>	Area Neta cm <sup>2</sup>
Med	C14	256,50	450,60	415,90	179	8,34	2143	194	19
Med	C15	257,00	450,30	415,60	180	8,35	2150	193	19
Med	C16	258,00	450,00	416,50	174	8,04	2169	192	19
Promedio =					178	8,25	2154	193	19
<b>Masa mínima, absorción y densidad</b>									
Masa	Cilindro	W <sub>Sumergido</sub>	W <sub>SSS</sub>	W <sub>seco</sub>	Absorción Kg/m <sup>3</sup>	Absorción %	Densidad seca Kg/m <sup>3</sup>	Volumen Neto cm <sup>2</sup>	Area Neta cm <sup>2</sup>
Min	C14	252,50	441,30	406,40	185	8,59	2153	189	19
Min	C15	250,50	441,60	405,90	187	8,80	2124	191	19
Min	C16	251,50	441,80	406,87	184	8,59	2138	190	19
Promedio =					185	8,66	2138	190	19

Fuente: Elaboración propia, 2017

Anexo 5. Cálculos de absorción, densidad, volumen neto y área neta de los cilindros de 5 cm x 10 cm realizados con el mejor diseño de mezcla liviana

<b>Masa máxima, absorción y densidad</b>									
Masa	Cilindro	W <sub>sumergido</sub>	W <sub>sss</sub>	W <sub>seco</sub>	Absorción Kg/m <sup>3</sup>	Absorción %	Densidad seca Kg/m <sup>3</sup>	Volumen Neto cm <sup>2</sup>	Area Neta cm <sup>2</sup>
Max	C14	172,00	363,80	340,30	123	6,91	1774	192	19
Max	C15	174,00	368,20	341,20	139	7,91	1757	194	19
Max	C16	172,30	364,10	341,10	120	6,74	1778	192	19
Promedio =					127	7,19	1770	193	19
<b>Masa media, absorción y densidad</b>									
Masa	Cilindro	W <sub>sumergido</sub>	W <sub>sss</sub>	W <sub>seco</sub>	Absorción Kg/m <sup>3</sup>	Absorción %	Densidad seca Kg/m <sup>3</sup>	Volumen Neto cm <sup>2</sup>	Area Neta cm <sup>2</sup>
Med	C14	162,50	360,20	331,80	144	8,56	1678	198	20
Med	C15	162,50	360,20	332,60	140	8,30	1682	198	20
Med	C16	162,90	360,70	332,10	145	8,61	1679	198	20
Promedio =					143	8,49	1680	198	20
<b>Masa mínima, absorción y densidad</b>									
Masa	Cilindro	W <sub>sumergido</sub>	W <sub>sss</sub>	W <sub>seco</sub>	Absorción Kg/m <sup>3</sup>	Absorción %	Densidad seca Kg/m <sup>3</sup>	Volumen Neto cm <sup>2</sup>	Area Neta cm <sup>2</sup>
Min	C14	157,50	352,20	320,80	161	9,79	1648	195	19
Min	C15	159,50	353,30	323,10	156	9,35	1667	194	19
Min	C16	155,80	350,90	320,10	158	9,62	1641	195	20
Promedio =					158	9,59	1652	195	19

Fuente: Elaboración propia, 2017

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR TUTOR DEL  
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD (TESIS DE GRADO)**

Heredia, 8 de septiembre, de 2017

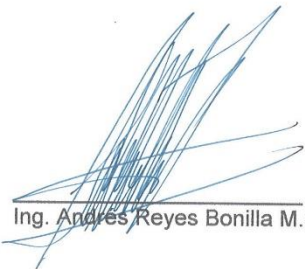
Sres.  
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación  
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad (Tesis de Grado) bajo el título **Evaluación del poliestireno expandido (EPS) como agregado en mezclas secas de concreto liviano para mampostería** por parte del estudiante: Juan José Álvarez Guzmán, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

**Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.**

Suscribe cordialmente,

  
Ing. Andrés Reyes Bonilla M.Sc

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR LECTOR DEL  
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD (TESIS DE GRADO)**

Heredia, 8 de septiembre, de 2017

Sres.  
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación  
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad (Tesis de Grado) bajo el título **Evaluación del poliestireno expandido (EPS) como agregado en mezclas secas de concreto liviano para mampostería** por parte del estudiante: Juan José Álvarez Guzmán, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

**Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.**

Suscribe cordialmente,

  
Ing. Minor Murillo Chacón


21 de setiembre de 2017

Señores  
Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Latina de Costa Rica  
Heredia

Estimados señores:

Hago constar que efectué la corrección filológica del trabajo final de graduación denominado: *Evaluación del poliestireno expandido (EPS) como agregado en mezclas secas de concreto liviano para mampostería*, realizado por el estudiante Juan José Álvarez Guzmán como requisito de la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Atentamente,

  
María Luisa Rodríguez Alpizar  
Lic. en Filología Española, código 15531  
Colegio de Licenciados y Profesores  
Tels. 8993 -1021

---

Correo electrónico: [mlralpizar@gmail.com](mailto:mlralpizar@gmail.com)





## “Carta Autorización del autor(es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016

*Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.*

Yo (Nosotros):

*Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "*

Juan José Álvarez Guzmán

De la Carrera / Programa: Licenciatura en Ingeniería Civil

autor (es) del (de la) *(Indique tipo de trabajo):* Tesis  
titulado:

Evaluación del poliestireno expandido (EPS) como agregado en mezclas secas de concreto liviano para mampostería

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página web institucional, así como medios electrónicos en general, internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos dentro o fuera de la Red Laureate, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de esta.

La presente autorización se extiende el día *(Día, fecha)* 14 del mes septiembre del año 2017 a las 3:00 pm. Asimismo declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: que soy el autor(a) del presente trabajo final de graduación, que el contenido de dicho trabajo es obra original del (la) suscrito(a) y de la veracidad de los datos incluidos en el documento. Eximo a la Universidad Latina; así como al Tutor y Lector que han revisado el presente, por las manifestaciones y/o apreciaciones personales incluidas en el mismo, de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores *Según orden de mención al inicio de ésta carta:*