



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Sustitución de cemento hidráulico por un polímero sustentable en mezclas de concreto y mortero.

Tesis

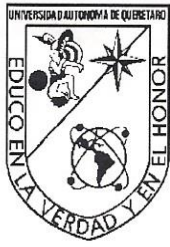
Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en ciencias (Construcción)

Presenta

Ing. Aarón Victor Manuel Galván Rodríguez

Santiago de Querétaro, Querétaro, junio 2018.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Sustitución de cemento hidráulico por un polímero sustentable en mezclas de concreto y mortero.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en ciencias (Construcción)

Presenta:

Ing. Aarón Victor Manuel Galván Rodríguez

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza.

SINODALES


Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Presidente

Dra. Teresa López Lara
Secretario

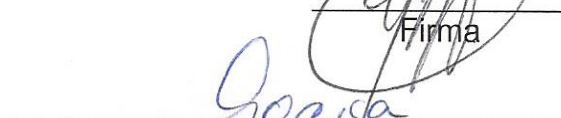
Dr. Jaime Horta Rangel
Vocal

Dr. Francisco Javier García Rodríguez
Suplente


M. C. Aleyda Coronado Márquez
Suplente




Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad de Ingeniería




Dr. Ma. Guadalupe Flavía Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado




Firma




Firma




Firma




Firma



Firma



Firma



Firma

RESUMEN

Dentro del campo de la construcción, y a lo largo de la historia, se han desarrollado numerosos materiales para la edificación, siempre buscando el objetivo de desarrollar materiales resistentes, económicos, innovadores y que contribuyan a un desarrollo sustentable, por esta razón es la importancia de experimentar con materiales reciclados como componentes de materiales y elementos de construcción. Este trabajo se enfoca en el uso del poliestireno expandido derivado del reciclaje de productos de deshecho, esto con el fin de obtener poliestireno líquido para ser usado como cementante entre partículas de mezclas comunes en la construcción y con ello lograr un material sustentable con propiedades similares a las mezclas convencionales de concreto hidráulico que se usan en la industria de la construcción. Se trabajaron en total 60 probetas de mortero de 5x5x5 cm divididas en 5 mezclas y con diferentes concentraciones de poliestireno líquido, las mezclas en las que se usó únicamente el poliestireno líquido como cementante tuvieron una resistencia a compresión del orden de 60 kg/cm² y densidades de 1100 kg/m³. En el caso de los concretos se trabajaron 48 probetas cilíndricas de 5x10 cm divididas en 4 mezclas y de igual manera se variaron las concentraciones de poliestireno líquido, de cada mezcla también se elaboraron 6 probetas rectangulares de 4x4x16 cm para su ensaye a flexión. Los resultados para las mezclas de concreto que tenían únicamente poliestireno líquido como cementante fueron una resistencia a compresión del orden de 115 kg/cm², una densidad de 1370 kg/m³ y un módulo de ruptura de 27 kg/cm². Ambas mezclas generadas presentaron una densidad más baja que las mezclas convencionales, por lo que facilita el manejo de estas y genera piezas de mampostería de bajo peso además que con este método se ayuda al reciclaje de espumas de EPS que en la actualidad no se acostumbra en México.

Palabras Clave (Desarrollo sustentable; Poliestireno expandido; Poliestireno líquido; Mezclas convencionales; Concreto hidráulico).

SUMMARY

Within the field of construction, and throughout history, numerous materials have been developed for building, always seeking the objective of developing resistant materials, economic, innovative and contributing to sustainable development, for this reason is the importance of experimenting with recycled materials as components of materials and building elements. This work focuses on the use of expanded polystyrene derived from the recycling of waste products, to obtain liquid polystyrene to be used as a cement between particles and thereby achieve a sustainable material with properties similar to conventional mixtures of hydraulic concrete which are used in the construction industry. A total of 60 cubes of mortar (5x5x5 cm) divided into 5 mixtures and with different concentrations of liquid polystyrene were tested, the mixtures in which the liquid polystyrene was used as cementitious material had a resistance to pressure of the order of 60 kg/cm² and densities of 1100 kg/m³. In the case of the concrete mixtures, 48 cylindrical specimens of 5x10 cm divided into 4 mixtures were tested and in the same way 6 rectangular specimens of 4x4x16 cm were made for their bending test for each mixture. The results for concrete mixtures with a 100% of liquid polystyrene as a cement were 115 kg/cm², a density of 1370 kg/m³ and a rupture modulus of 27 kg/cm². Both mixtures, mortar and concrete, have a lower density than conventional mixtures, which facilitates the handling of them and generates pieces of low weight masonry and with this method helps the recycling of EPS foams that currently is not used in Mexico.

Keywords (Sustainable development; Expanded polystyrene; Liquid polystyrene; Conventional mixtures; Hydraulic concrete).

DEDICATORIAS

A DIOS

Primeramente, gracias santo padre, por permitirme escribir estas líneas, te agradezco, por ayudarme, cuidarme y bendecirme en todo momento.

A MIS PADRES

Gracias por su apoyo, por creer, confiar en mí y animarme en seguir adelante en todo momento, por estar siempre a mi lado, este logro no solo es mío sino también de ustedes.

A MIS HERMANOS

Ya que siempre me estuvieron apoyando en todo momento y siempre encuentro consuelo en sus palabras. Mis mejores deseos para ellos, también este es un logro suyo.

A MI FAMILIA Y AMIGOS

Gracias por su apoyo incondicional a todos y cada uno de ellos, ya que con su apoyo me he convertido en la persona que soy hoy y he aprendido las lecciones más importantes en mi vida.

A MI NOVIA

Gracias por siempre estar ahí para mí, gracias por cuidarme y preocuparte por mí, gracias por siempre apoyarme en todo momento. Te amo Lupita.

Agradezco a todas las personas que me apoyaron con este trabajo, que invirtieron tiempo y dedicación, y a los que contribuyeron con su granito de arena, con comentarios, sugerencias y aportaciones para que esto saliera adelante... muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, el Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, por su apoyo y confianza para realizar este trabajo. Gracias por apoyarme y brindarme su amistad y consejos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), por el apoyo y los financiamientos brindados para la realización de este trabajo.

A mis sinodales Dra. Teresa López Lara, Dr. Jaime Horta Rangel, Dr. Francisco Javier García Rodríguez y la M. en C. Aleyda Coronado Márquez; por sus comentarios y aportes a este trabajo de tesis.

Al Dr. José Luis Reyes Araiza y al Dr. Juan Carlos Antonio Jáuregui Correa por sus críticas y comentarios durante la realización de este trabajo.

A todos los profesores y personal de la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DIPFI) los cuales formaron mi conocimiento durante mi estancia en la institución.

A mis compañeros de generación ya que ayudaron a tener un ambiente de amistad y compañerismo además haciendo que este fuese más ameno a lo largo de los dos años en el posgrado.

Y a todos los que hicieron posible la realización de este trabajo. Muchas gracias.

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
SUMMARY.....	ii
DEDICATORIAS.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 Línea de investigación.....	7
1.3 Justificación.	7
1.4 Hipótesis.	8
1.5 Objetivo general.	8
1.6 Objetivos específicos.	8
2. ANTECEDENTES.....	10
2.1 ¿Qué es el cemento hidráulico?.....	10
2.2 ¿Qué es el concreto?	10
2.3 ¿Qué es el mortero?	12
2.4 Usos y aplicaciones del poliestireno expandido en la construcción.....	13
2.4.1 Mortero compuesto a base de EPS y Cemento Portland.....	13
2.4.2 Uso de perlas de EPS en mezclas de mortero y concreto en combinación de humo de sílice.....	14
2.4.3 Concreto ligero adicionado con EPS.....	15

2.4.4	Fabricación de piezas de mampostería de baja densidad con material reciclado de EPS.....	16
2.4.5	Desarrollo de un nuevo proceso de reciclaje de residuos de EPS....	18
2.4.6	Residuos Modificados de Poliestireno Expandido (RMPE) como agregado potencial en concretos ligeros.....	19
2.4.7	Variación de la resistencia en concretos ligeros adicionados con EPS.....	20
2.4.8	Desarrollo de un material termoaislante ligero a base de EPS.....	21
2.4.9	Desarrollo de paneles aislantes a base de materiales reciclados, entre ellos EPS.....	22
2.4.10	Sustitución de fenolita por poliestireno líquido para el desarrollo de tarjetas de circuitos integrados.....	24
3.	METODOLOGÍA.....	26
3.1	Trabajo experimental.....	26
3.1.1	Trabajos previos a la experimentación.....	27
3.1.1.1	Recolección de material.	27
3.1.1.2	Procesado del material polimérico (EPS).....	28
3.1.1.2.1	Materiales y procedimiento.....	29
3.1.1.2.2	Materiales.	29
3.1.1.2.3	Equipo utilizado.....	30
3.1.1.3	Caracterización de agregados.....	30
3.1.1.3.1	Caracterización de la grava.....	31
3.1.1.3.2	Caracterización de la arena.....	36
3.1.2	Etapa general.....	39
3.1.3	Etapa final.....	40
3.2	Materiales.....	40
3.2.1	Materiales de mezcla para probetas de PL.....	40
3.2.2	Materiales de mezcla para probetas de mortero.....	41
3.2.3	Materiales de mezcla para probetas de concreto.....	41

3.3	Equipo.	41
3.3.1	Equipo manual.	41
3.3.2	Equipo eléctrico y mecánico.....	42
3.4	Elaboración y ensaye de probetas.....	42
3.4.1	Elaboración de probetas de PL.....	42
3.4.1.1	Prueba de densidad a probetas de PL.....	45
3.4.1.2	Prueba de absorción en 24 horas a probetas de PL.....	47
3.4.1.3	Prueba de compresión simple a probetas de PL.....	48
3.4.2	Elaboración de probetas de mortero.	48
3.4.2.1	Prueba de fluidez.....	50
3.4.2.2	Prueba de densidad a probetas de mortero.....	52
3.4.2.3	Prueba de absorción en 24 horas a probetas de mortero.....	52
3.4.2.4	Prueba de compresión simple a probetas de mortero.....	53
3.4.3	Elaboración de probetas de concreto.....	55
3.4.3.1	Prueba de peso volumétrico en estado fresco.....	58
3.4.3.2	Prueba de densidad a probetas de concreto.....	59
3.4.3.3	Prueba de revenimiento a mezclas de concreto.....	59
3.4.3.4	Prueba de absorción en 24 horas a probetas de concreto.....	61
3.4.3.5	Prueba de compresión simple a probetas de concreto.....	62
3.4.3.6	Prueba de flexión pura a probetas de concreto.....	63
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN.....	65
4.1	Resultados de probetas de PL.....	65
4.1.1	Resultados de prueba de densidad.....	65
4.1.2	Resultados de prueba de absorción en 24 horas.....	66
4.1.3	Resultados de prueba de compresión simple.....	66
4.2	Resultados de probetas de mortero.....	67
4.2.1	Resultados de prueba de fluidez.....	67
4.2.2	Resultados prueba de densidad a probetas de mortero.....	69

4.2.3	Resultados prueba de absorción en 24 horas a probetas de mortero.....	70
4.2.4	Resultados prueba de compresión simple a probetas de mortero....	71
4.2.4.1	Resultados de compresión simple en mezcla de mortero cemento – arena.....	71
4.2.4.2	Resultados de compresión simple en mezcla de mortero cemento – PL (20% 25%) – arena.....	72
4.2.4.3	Resultados de compresión simple en mezcla de mortero cemento – PL (15%) – arena.....	73
4.2.4.4	Resultados de compresión simple en mezcla de mortero cemento – PL (20%) – arena.....	74
4.2.4.5	Resultados de compresión simple en mezcla de mortero cemento – PL (25%) – arena.....	75
4.2.4.6	Resultados de compresión simple en mezclas de mortero.....	76
4.3	Resultados de probetas de concreto.....	77
4.3.1	Resultados de prueba de peso volumétrico en estado fresco.....	78
4.3.2	Resultados de prueba de densidad a probetas de concreto.....	78
4.3.3	Resultados de prueba de revenimiento a mezclas de concreto.....	79
4.3.4	Resultados de prueba de absorción en 24 horas a probetas de concreto.....	80
4.3.5	Resultados de prueba de compresión simple a probetas de concreto.....	81
4.3.5.1	Resultados de compresión simple de mezcla cemento – grava – arena.....	81
4.3.5.2	Resultados de compresión simple de mezcla cemento - PL 20% 25% - grava - arena.....	82
4.3.5.3	Resultados de compresión simple de mezcla PL 20% - grava 13 y 10 mm.....	83
4.3.5.4	Resultados de compresión simple de mezcla PL 20% - grava 10 mm a finos.....	84
4.3.5.5	Resultados de compresión simple en mezclas de concreto.....	85
4.3.6	Resultados de prueba de flexión pura a probetas de concreto.....	86
4.3.7	Mecánica de fractura en probetas de concreto.....	87

5. CONCLUSIONES.....	93
6. REFERENCIAS.....	95
7. ANEXO 1. TERMINOLOGÍA EMPLEADA.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Producción Mundial de Plásticos distribuido por países productores, 2001.....	4
2. Producción Mundial de Plásticos por tipo de plástico, 2001.	5
3. Modos de falla de mortero con EPS a distintas densidades: a) 150 kg/m ³ , b) 250 kg/m ³ y c) 400 kg/m ³	14
4. Modos de falla de bloques de mortero adicionado con poliestireno expandido, densidad de 1500 kg/m ³	16
5. Grietas resultantes en el tabique después de prueba de compresión.....	17
6. Grietas resultantes en el tabique después de prueba de tensión.....	17
7. a) Desechos de EPS, b) agregado de RMPE, c) RMPE después de tratamiento térmico.....	19
8. Modos de falla por separación de muestras de concreto con agregados de RMPE.....	20
9. El efecto de EPS en la resistencia a la compresión del concreto a diferentes edades.....	21
10. Microestructura de gránulo de poliestireno (X120): a) partícula grande, b) partícula desmoronada, c) partícula fina.....	22
11. Estructura interna de los paneles fabricados con cartón reciclado – PE y fibras textiles.....	24
12. Poliestireno Líquido endurecido usado como sustituto de fenolita en la fabricación de tarjetas de circuitos electrónicos.....	25
13. Residuos de espuma de EPS obtenidos de desperdicio de empaques y embalajes.....	28
14. Espuma de EPS en fragmentos de 4 a 6 cm de diámetro listo para disolución.....	29
15. Gráfico de curva granulométrica de grava empleada en el experimento.....	33
16. Gráfico de curva granulométrica de arena empleada en el experimento.....	38

Figura	Página
17. Moldes para probetas de PL.....	44
18. Probetas de PL endurecido y labrado. Vista frontal	44
19. Probetas de PL endurecido y labrado. Vista en planta.....	44
20. Medición de altura de probeta de PL endurecido.....	45
21. Pesado de probeta de PL endurecido.....	45
22. Inmersión de probetas de PL en agua.....	46
23. Prueba de compresión simple a probeta de PL.....	47
24. Modo de falla a compresión simple de probeta de PL.....	48
25. Pesado de cemento Portland.....	49
26. Mezcla arena-cemento-agua.....	49
27. Mezcla arena – PL.....	50
28. Probetas de mortero, distintas mezclas.....	50
29. Herramienta para realizar prueba de fluidez.....	50
30. Masa de mortero en el cono y mesa de fluidez.....	51
31. Masa de mortero expandida después del ensaye de fluidez.....	51
32. Medición de cubo de mortero.....	52
33. Pesado de cubo de mortero arena-cemento.....	52
34. Inmersión de probetas de mortero arena-PL en agua.....	53
35. Pesado de cubo de mortero arena-PL después de la absorción.....	53
36. Prueba de compresión simple a cubo de mortero arena-PL.....	54
37. Prueba de compresión simple a cubo de mortero arena-cemento.....	54
38. Pesado de grava.....	56

Figura	Página
39. Mezcla de concreto simple.....	56
40. Cilindros y vigas de concreto simple recién colados.....	57
41. Cilindros y vigas de concreto a base de PL recién colados.....	57
42. Varillado de concreto.....	58
43. Peso de cubeta con concreto.....	58
44. Medición de cilindro de concreto.....	59
45. Pesado de cilindro de concreto.....	59
46. Llenado de cono de revenimiento.....	60
47. Medición del revenimiento a mezcla de concreto base PL.....	60
48. Inmersión de probetas de concreto grava-PL en agua.....	61
49. Pesado de cilindro de concreto grava-PL después de la absorción.....	61
50. Cilindros cabeceados, concreto simple.....	62
51. Prueba de compresión simple a cilindro de concreto base cemento portland..	63
52. Prueba de compresión simple a cilindro de concreto base PL.....	63
53. Esquema de prueba de flexión pura.....	64
54. Prueba de fluidez en mezclas base PL.....	68
55. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla cemento – arena.....	71
56. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla cemento – PL (20% 25%) – arena.....	72
57. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla PL (15%) – arena.....	73
58. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla PL (20%) – arena.....	74
59. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla PL (25%) – arena.....	75
60. Gráfico de resistencia a compresión de mezclas.....	76

Figura	Página
61. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla cemento - grava – arena.....	81
62. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla Cemento - PL 20% 25% - Grava - Arena.....	82
63. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla PL 20% - grava 13 y 10 mm.....	83
64. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla PL 20% - grava 10 mm a finos.....	84
65. Gráfico de resistencia a compresión de mezclas.....	85
66. Gráfico de resistencia a flexión pura en mezclas de concreto.....	87
67. Diagramas de fallas de cilindros en prueba de compresión.....	89
68. Falla de cilindro #2 de concreto en prueba de compresión.....	89
69. Falla de cilindro #4 de concreto en prueba de compresión.....	90
70. Restos de probetas de cilindros de concreto en prueba de compresión.....	90
71. Falla de cilindro #2 de concreto base PL en prueba de compresión, agregado fino.....	91
72. Falla de cilindro #6 de concreto base PL en prueba de compresión, agregado grueso.....	91
73. Falla de cilindro #10 de concreto base PL en prueba de compresión, agregado grueso.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Rangos con los cuales cumple la denominación de mortero de baja densidad.	15
2. Propiedades comparativas de muestras A y B en comparación con los parámetros reportados.....	18
3. Pesos volumétricos secos sueltos de la grava utilizada en el experimento.....	32
4. Pesos volumétricos secos compactos de la grava utilizada en el experimento.....	32
5. Porcentaje de grava retenido en mallas.....	33
6. Coeficientes de uniformidad y curvatura.....	35
7. Pesos volumétricos secos sueltos de la arena utilizada en el experimento.....	37
8. Pesos volumétricos secos compactos de la arena utilizada en el experimento.....	37
9. Porcentaje de arena retenido en mallas.....	38
10. Resultados de densidad de probetas de PL endurecido.....	65
11. Resultados de absorción en probetas de PL endurecido.....	66
12. Resultados de compresión simple en probetas de PL endurecido.....	66
13. Dosificaciones usadas en cada tipo de mezcla de mortero.....	67
14. Fluidéz obtenida por tipo de mezcla.....	68
15. Densidades de las distintas mezclas de mortero.....	69
16. Absorción de las distintas mezclas de mortero.....	70
17. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla cemento – arena.....	71
18. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla cemento – PL (20% 25%) – arena.....	72
19. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla PL (15%) – arena.....	73

Tabla	Página
20. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla PL (20%) – arena.....	74
21. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla PL (25%) – arena.....	75
22. Resistencias a compresión de las mezclas de mortero.....	76
23. Dosificaciones usadas en cada tipo de mezcla de concreto.....	77
24. Peso volumétrico en estado fresco de cada tipo de mezcla de concreto.....	78
25. Densidades de las distintas mezclas de concreto.....	79
26. Revenimiento de las distintas mezclas de concreto.....	80
27. Absorción de las distintas mezclas de concreto.....	80
28. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla cemento – grava – arena.....	81
29. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla cemento – PL 20% 25% – Grava – Arena.....	82
30. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla PL 20% - grava 13 y 10 mm.....	83
31. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla PL 20% – grava 10 mm a finos.....	84
32. Resistencias a compresión de las mezclas de concreto.....	85
33. Resistencias a flexión pura de las mezclas de concreto.....	86

1. INTRODUCCIÓN

En este documento se aborda el estudio de la propuesta de un material, que resulta al mezclar residuos reciclados de poliestireno expandido (EPS) diluido en un solvente, para posteriormente utilizar esta mezcla como cementante en agregados gruesos y finos y sustituir de esta manera el uso de un cementante hidráulico común en la construcción como lo es el cemento portland.

La forma propuesta de reciclaje del poliestireno busca colaborar a la reducción del problema de la gestión de los residuos de plásticos celulares que se producen en las ciudades. Principalmente de aquellos que provienen de aplicaciones de embalaje que, por sus características de uso y después de una corta vida útil, son dispuestos para el flujo de residuos en grandes cantidades y cuando sus propiedades como espumas se encuentran generalmente intactas.

Este esfuerzo busca presentar una alternativa para conservar la utilidad y alargar el ciclo de vida de los residuos de este tipo, lo que en principio coopera a disminuir las cantidades de poliestireno para ser reciclados o revalorados y, en el caso más indeseable, a postergar su depósito en los rellenos municipales.

El progreso y bienestar que hoy gozan en los países industrializados también se refleja en efectos indeseados, como son severos impactos al medioambiente a escala local y global, producto de un consumo desenfrenado de recursos en materiales y energía. Hay otras muchas señales que nos indican la falta de sustentabilidad de nuestras formas de producir, comerciar y consumir. Un mensaje claro de los desajustes del estilo de vida con el entorno es la evidente acumulación de residuos que se vierten en mayor o menor escala y con diferentes características en la mayoría de las sociedades del mundo. El problema de los residuos es un mal de hoy, difícil de soportar, pero factible de atender para reducir sus consecuencias.

De manera consistente crece en la sociedad el convencimiento de la necesidad por reducir la cantidad de residuos. Para lograrlo, son condiciones el

disminuir el consumo de los mismos y después aumentar el reciclaje de estos materiales y para ello se han desarrollado diversas técnicas que buscan retornar al ciclo industrial a los residuos, conservando de la mejor manera sus propiedades originales.

Desde nuestras posibilidades, buscando aportar a la mejora del medioambiente por medio del reciclaje de residuos de poliestireno, nos hemos propuesto mostrar una forma novedosa y sencilla de alargar la vida útil de esos materiales y que pretende, por un lado, disminuir la demanda de materiales vírgenes y además permitirnos ofrecer un producto para la construcción que coopere posiblemente al uso eficiente de la energía en las edificaciones.

A lo largo de los siglos, y prácticamente en todas las culturas, los cementantes han tenido un amplio uso en todo tipo de edificaciones, estos concretos se ajustaban muy bien a las diversas técnicas constructivas, por lo que se usaron durante mucho tiempo sin cambios sustanciales. Hoy en día el hombre ha tratado de crear e innovar nuevos materiales de construcción con mejores ventajas en cuanto a resistencia, ligereza, manejabilidad, permeabilidad y con propiedades térmicas y acústicas, pero siempre ligadas a un menor costo y recientemente con la utilización de materiales reciclados participando así en el esquema sustentable que se ha desarrollado en los últimos años. Es por ello que se han desarrollado concretos y morteros con dosificaciones que contengan un cementante a base de un polímero sustentable (Poliestireno Líquido-PL), permitiendo obtener mezclas relativamente iguales a las tradicionales en tema de resistencia y manejabilidad principalmente.

Por lo tanto, la necesidad del hombre por poseer un material que tenga diversas propiedades y características favorables tanto para la construcción como el medio ambiente lo ha llevado a experimentar con innovadoras técnicas para la elaboración de diversos materiales sustentables, desgraciadamente, esta tendencia no ha sido del todo adoptada por los constructores, quienes han preferido los sistemas constructivos tradicionales de mezclas convencionales.

Por lo que nuestro objetivo en este trabajo es desarrollar mezclas con un adecuado comportamiento estructural y con características favorables como lo son resistencia a compresión, resistencia a flexión, impermeabilidad y menor porosidad de los elementos elaborados; y posiblemente mezclas con buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico. Además de que a su vez ofrezca un beneficio ecológico.

En la actualidad, de acuerdo al Protocolo de Kioto puesto en marcha el 16 de febrero del 2005, se está tratando de disminuir el calentamiento global; una forma en la que se podría realizar esto, es disminuir el consumo de cemento portland, ya que al elaborar dicha mezcla se emiten al aire diversos contaminantes (monóxido de carbono, bióxido de carbono, monóxido de nitrógeno, dióxido de azufre, y partículas muy finas) dependiendo del tipo de combustible y proceso empleado durante la calcinación en el horno. Se estima que la producción de cemento portland genera de 7% a 9% de los gases de efecto invernadero alrededor del mundo, esto es aproximadamente 3.25 giga toneladas de dióxido de carbono (CO₂) anualmente (Habert, 2013).

1.1 Descripción del problema.

El siglo XXI ha conllevado un uso casi ilimitado de los plásticos; los productos elaborados con estos materiales se encuentran presentes en la vida cotidiana formando parte de objetos como muebles, juguetes, piezas de automóvil, bolígrafos, ropa y recipientes para alimentos, solo por mencionar algunos. Sin embargo, con el desarrollo de la industria del plástico, desde hace aproximadamente 50 años, también se ha promovido indiscriminadamente el uso de envases “desechables” para transportar y contener toda clase de artículos, los que después de una muy corta vida útil, se convierten en basura, contribuyendo a deteriorar el entorno, ya que al degradarse (lo que puede suceder en tres meses o hasta en 500 años) entran en las cadenas alimenticias de animales, plantas y del mismo ser humano. Evidentemente lo anterior ha llevado a una crisis ambiental que deriva en un desarrollo poco sustentable que en la actualidad alcanza dimensiones mundiales (Hernández, López, Martínez, & Menchaca,

2015).

Desde la aparición de los plásticos como materiales industriales, tanto su producción como el consumo de estos materiales ha crecido de forma sostenida, a excepción de ciclos que corresponden con hechos puntuales, como fue la crisis petrolera de los años setenta y la guerra de Irak en el 2002. En fechas recientes esta tendencia al crecimiento se ha confirmado.

La producción mundial de plásticos para el año 2001 se concentra en tres grandes bloques de productores. Norteamérica y Europa Occidental dominan con el 27% de la producción mundial cada uno, Sudeste de Asia con el 24,5% y el resto se distribuye en las diferentes áreas geográficas del mundo (ver figura 1). La producción mundial de plásticos para el año 2003 fue de 169 millones de toneladas (Godoy, 2014).

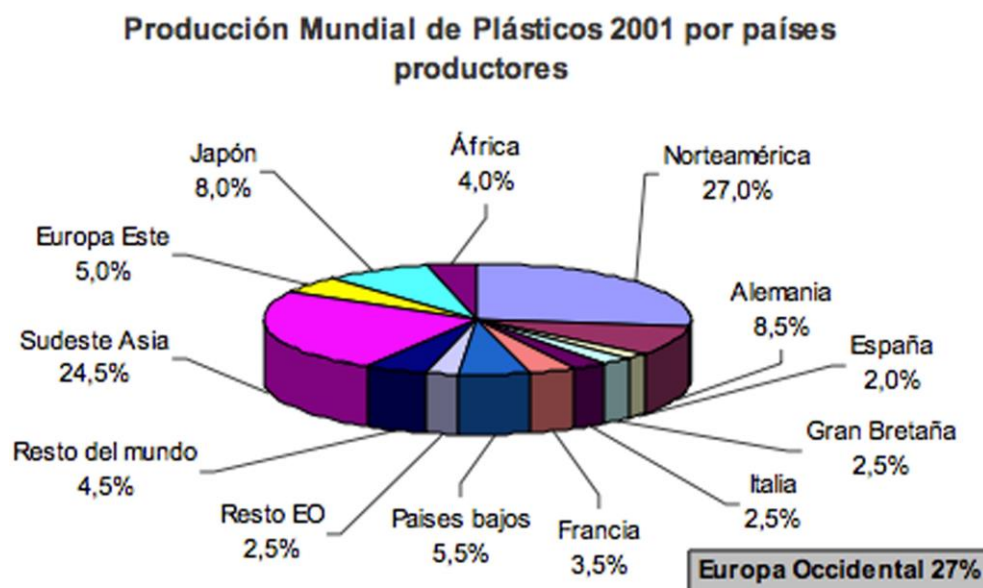


Figura 1. Producción Mundial de Plásticos distribuido por países productores, 2001. Fuente: (Godoy, 2014).

En la producción mundial por tipo de plásticos, las poli-olefinas mantuvieron su hegemonía sobre otras resinas con un porcentaje total del 53%, seguidas de lejos por el PVC con 17%. La producción de poliestireno y del poliestireno expandido (EPS) participaron con un 8,5% (Godoy, 2014).

Producción mundial por tipo de plástico 2001

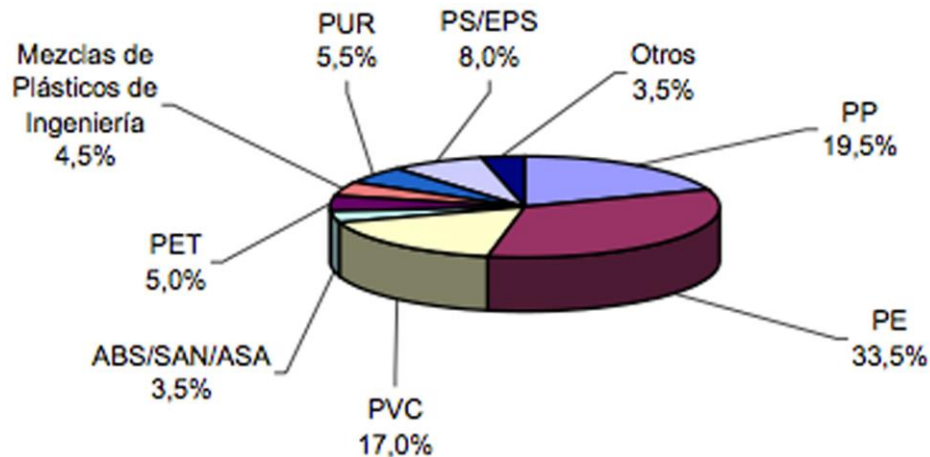


Figura 2. Producción Mundial de Plásticos por tipo de plástico, 2001.
Fuente: (Godoy, 2014).

En el escenario socio-ambiental en que se vive se ha aumentado la preocupación de los recursos naturales más allá de los productos y subproductos de la reutilización. El reciclaje es el enfoque de reintroducir materia o energía en el sistema productivo. El reciclaje permite la reducción del volumen de basura que se vierte en el medio ambiente, ahorro de energía y la disminución de la exigencia de los recursos naturales. En general, el fin del EPS es el relleno sanitario o vertederos de basura sin control que tienen gran volumen y se propaga fácilmente por la acción eólica, con el problema ambiental de la contaminación, sin embargo, el reciclaje evita su uso indebido y la obtención de este material a partir del petróleo se reduce (Schmidt et al., 2011).

Más de 350 mil toneladas anuales de unicele se producen en México. El EPS, es un plástico rígido, fabricado a partir del moldeo de perlas pre expandidas que presenta una estructura celular cerrada y rellena de aire. Se estima que la producción en México sea de 350 mil toneladas de EPS al año, de las cuales se recicla menos del 1%, y el resto es confinado en los rellenos sanitarios donde alcanza a ocupar el 15% del volumen, y puede tardar entre 500 y 800 años en degradarse (Araiza, 2012).

De acuerdo al Instituto Nacional de Ecología, los residuos que llegan al relleno sanitario son en más del 50% orgánicos, cerca del 40% de los residuos de las ciudades están constituidos por envases y embalajes, en tercer lugar el EPS, el 10% restante son productos de difícil reciclado (Araiza, 2012).

Además del problema que presenta el EPS hablando de residuos urbanos, también existe el problema de la contaminación generada a partir de la fabricación del cemento hidráulico y es que la producción de cemento ha experimentado un tremendo desarrollo desde sus comienzos hace unos 2000 años. Si bien el uso del cemento en el concreto tiene una larga historia, la producción industrial de cementos comenzó a mediados del siglo XIX, primero con hornos de eje, que posteriormente fueron reemplazados por hornos rotativos como equipamiento estándar en todo el mundo. La producción global anual de cemento de hoy en día alcanza los 2,800 millones de toneladas, y se espera que aumente a unos 4 mil millones de toneladas al año (Schneider, Romer, Tschudin, & Bolio, 2011).

Se prevé que se presente un mayor crecimiento en países como China y la India, así como en regiones como el Medio Oriente y el Norte de África. Al mismo tiempo, la industria del cemento se enfrenta a retos como el aumento de los costos en el suministro de energía, los requerimientos para reducir las emisiones de CO₂ y el suministro de materias primas con calidades y cantidades suficientes. El Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés) y su Iniciativa de Sostenibilidad del Cemento, integrada por productores de cemento de todo el mundo, ha iniciado el proyecto "Obteniendo los números correctos", que por primera vez proporciona una buena base de datos para la mayor parte de la industria global del cemento. La producción de cemento es responsable del 5% de las emisiones globales de CO₂ antropogénicas y del 7% del consumo de combustibles industriales (Habert, 2013).

1.2 Línea de investigación.

La necesidad del hombre por poseer una vivienda digna lo ha llevado a experimentar con nuevas e innovadoras técnicas para la construcción de viviendas. Sin embargo, esta tendencia no ha sido adoptada por los constructores mexicanos, quienes han preferido los sistemas constructivos tradicionales de concretos, morteros y mampostería. Hoy en día esto ya no es posible, la gran cantidad de demanda de vivienda en México ha crecido por lo que se hace necesaria la inversión en investigación para considerar nuevas opciones que permitan construir una mayor cantidad de viviendas, reducir el tiempo de construcción y, en algunos casos, el costo final de ejecución.

El crecimiento de las ciudades y el poco espacio en éstas, ha obligado a desarrollar ciudades verticales, es decir edificios de gran altura, que en muchas ocasiones su diseño se encuentra ligado al peso que gravita sobre la cimentación del edificio. Sin embargo, la utilización de morteros ligeros ha hecho posible la construcción de algunos de estos edificios, gracias al bajo peso del material. Bajo esta línea se maneja parte de esta investigación al desarrollar morteros con pesos volumétricos más bajos a los convencionales.

El mortero ligero es un material que tiene grandes ventajas, en cuanto tiempo, costo, técnicas y aspectos ambientales.

En las construcciones es de gran importancia contar con materiales que puedan brindar una excelente trabajabilidad y manejabilidad, es importante tener materiales que se puedan acarrear y colocar fácilmente. Gracias a la baja densidad del poliestireno líquido y en combinación con arena formando el mortero de baja densidad, este reduciría estos tiempos de ejecución, reflejándolo en el costo final de la construcción.

1.3 Justificación.

El motivo para efectuar el presente trabajo de investigación corresponde a la necesidad de desarrollar sistemas alternativos y eficientes para la elaboración de nuevos materiales sustentables, en este caso mezclas de concreto y de

mortero, utilizando el Polímero Sustentable (PS) en este caso el poliestireno líquido (PL), se evaluará la viabilidad analizándose el comportamiento bajo pruebas de: peso volumétrico en estado fresco, revenimiento, absorción, compresión simple y flexión pura.

Además de lo anterior, se pretende incursionar en esta línea de investigación a falta de investigación en México relacionada con el uso de Polímeros Sustentables (PS) en mezclas de concretos y morteros, es evidente esperar una diferencia en las características tanto físicas como mecánicas en la unión de agregados convencionales y PS, debido a la falta de conocimiento en nuestra región surge la necesidad de evaluar y valorar la aplicabilidad de estas mezclas a base de material reciclado.

1.4 Hipótesis.

El Poliestireno Líquido mezclado con agregados gruesos y finos genera mezclas similares en manejabilidad y resistencia a las de concretos y morteros a base cemento hidráulico.

1.5 Objetivo general.

Desarrollar mezclas de concreto y mortero usando el Polímero Sustentable (PS-Poliestireno Líquido) como cementante con características de manejabilidad y resistencia similares a las mezclas base cemento hidráulico.

1.6 Objetivos específicos.

- 1) Caracterizar las propiedades físicas del Polímero Sustentable para que sea usado como material cementante en mezclas de concreto y mortero.
- 2) Desarrollar una mezcla de concreto que posea una resistencia a la compresión a los 28 días de 100 kg/cm^2 como mínimo para que cumpla la resistencia mínima del RCDF-NTC 2004 para la fabricación de piezas de mampostería.
- 3) Desarrollar una mezcla de mortero que posea una resistencia a la compresión a los 28 días de 60 kg/cm^2 como mínimo para que cumpla la

resistencia mínima de piezas de mampostería señalada en el RCDF-NTC 2004.

- 4) Proporcionar resultados viables para que posteriormente se evalúe el impacto ambiental que tiene esta investigación.

2. ANTECEDENTES

2.1 ¿Qué es el cemento hidráulico?

Un material cementante es aquel que tiene las propiedades de adhesión y cohesión necesarias para unir agregados inertes y conformar una masa sólida de resistencia y durabilidad adecuadas. Esta categoría tecnológicamente importante de materiales incluye no solo el cemento sino también limos, asfaltos y alquitranes, tal como se usan en la construcción de carreteras y otros. Para la fabricación del concreto estructural se utilizan exclusivamente los llamados cementos hidráulicos. Para completar el proceso químico (hidratación) mediante el cual el polvo de cemento fragua y endurece para convertirse en una masa sólida se requiere la adición de agua. De los diferentes cementos hidráulicos desarrollados, el cemento Portland, patentado por primera vez en Inglaterra en 1824, es el más común de todos (Nilson, 2010).

El cemento Portland es un material grisáceo finamente pulverizado, conformado fundamentalmente por silicatos de calcio y aluminio. Las materias primas usuales a partir de las cuales se fabrica son calizas que proporcionan el CaO y arcillas y esquistos que proveen el SiO₂ y el Al₂O₃. Estos materiales se muelen, se mezclan, se funden en hornos hasta obtener el llamado clinker, se enfrían y se muelen de nuevo para lograr la finura requerida. Cuando el cemento se mezcla con el agua para conformar una pasta suave, esta se rigidiza gradualmente hasta conformar una masa sólida. Este proceso se conoce como fraguado y endurecimiento. Se dice que el cemento ha fraguado cuando ha ganado la suficiente rigidez para resistir una presión arbitrariamente definida, punto a partir del cual continúa endureciendo durante un largo tiempo, o sea que sigue ganando resistencia (Nilson, 2010).

2.2 ¿Qué es el concreto?

El concreto es un material similar a una roca que se obtiene al permitir una mezcla, cuidadosamente medida de cemento, arena y grava u otros agregados, y

agua para endurecer en la forma y dimensión de la estructura deseada.

La mezcla consiste en agregado fino y grueso. El cemento y el agua interactúan químicamente para unir las partículas de agregado en una masa sólida. El agua adicional, más allá de la necesaria para esta reacción química, es necesaria para dar a la mezcla la trabajabilidad que le permite llenar las formas y rodear el acero de refuerzo incrustado antes del endurecimiento.

Pueden obtenerse concretos con una amplia gama de propiedades mediante un ajuste apropiado de las proporciones de los materiales constituyentes. Los cementos especiales (tales como cementos de alta resistencia temprana), agregados especiales (tales como plastificantes, agentes de arrastre de aire, humo de sílice y cenizas volantes) y métodos de curado especiales (tales como curado al vapor) permiten una amplia variedad de propiedades adquiridas.

Estas propiedades dependen en gran medida de:

- Las proporciones de la mezcla.
- El cuidado con los diversos constituyentes que se entremezclan.
- Las condiciones de humedad y temperatura en las que se mantiene la mezcla desde el momento en que se coloca en el molde o cimbra, hasta las terminaciones y el curado.

Para proteger contra la producción no intencional de concreto de calidad inferior, es necesario un alto grado de control y supervisión durante todo el proceso, desde la dosificación de los materiales individuales, la mezcla y colocación, hasta la finalización del curado

Algunos factores que hacen del concreto un material de construcción universal son:

- La colocación con la que, mientras que es plástico, se puede depositar y hacer para rellenar formas o moldes de cualquier forma práctica.
- Su alta resistencia al fuego y a la intemperie.

- La mayoría de los materiales constitutivos, con la excepción del cemento y los aditivos, suelen estar disponibles a bajo costo localmente o a pequeñas distancias del sitio de construcción.
- Su resistencia a la compresión, al igual que la de las piedras naturales, que lo hace apto para miembros sometidos principalmente a compresión, como columnas y arcos.

Por otra parte, de nuevo como en las piedras naturales, es un material relativamente quebradizo cuya resistencia a la tensión es pequeña en comparación con su resistencia a la compresión.

La densidad que presentan los concretos nos puede dar una idea del uso o aplicación que se les puede dar, ya que las ventajas de tener materiales con baja densidad en el proceso de construcción son numerosas; por ejemplo: permiten emplear secciones de menor tamaño y reducir las dimensiones de los cimientos, la cimbra soporta menor presión que la que tendría que resistir con el concreto normal, se incrementa la rapidez de construcción y se generan menores costos en transporte y acarreos; por estos motivos se realizaron pruebas de densidad a las mezclas trabajadas en el laboratorio con el fin de darnos una idea sobre su posible aplicación, debe tenerse en cuenta que cuando se tienen mezclas de baja densidad estas tenderán a bajar su resistencia (García, 2011).

2.3 ¿Qué es el mortero?

Los morteros son mezclas plásticas aglomerantes, que resultan de la combinación de arena y agua con un cementante que puede ser cemento, cal, yeso, o una mezcla de estos materiales.

La dosificación de los morteros varía según los materiales y el destino de la mezcla. Se elaboran comúnmente en forma manual, mecánicamente o bien, premezclados.

Es amplia la utilización de morteros, de cemento, de cal o mixtos; destacando su empleo en mamposterías, aplanados, recubrimientos y pegado de piezas diversas.

En reglamentos oficiales de la República Mexicana la especificación de la resistencia mínima a compresión en morteros para mampostería de piedras artificiales es de 40.0 kg/cm², mientras para que mampostería de piedras naturales es de 15.0 kg/cm² (Grupo Calidra, 2017).

2.4 Usos y aplicaciones del poliestireno expandido en la construcción.

En la actualidad se han desarrollado y usado diversos compuestos en la industria para mejorar las mezclas de concreto en la construcción, tal es el caso de morteros y concretos celulares, el uso de estos presenta diversas ventajas tales como: reducción significativa de cargas muertas de las estructuras, así como la reducción de sus secciones transversales y el tamaño de las cimentaciones. Generalmente el uso de un concreto ligero ayuda a reducir los daños que ocasiona un sismo ya que la aceleración y su magnitud depende en gran medida del peso de la estructura. Baja densidad, alta relación resistencia/peso, coeficientes de conductividad térmica más bajos, mejor resistencia al fuego, mejoramiento de las propiedades de durabilidad y una mejor capacidad de aislamiento sonoro son factores que se incrementan con el uso de concretos ligeros (Sayadi, Tapia, Neitzert, & Clifton, 2016).

2.4.1 Mortero compuesto a base de EPS y Cemento Portland.

Sayadi et al. (2016) estudiaron los efectos y el modo en que contribuyen las partículas de Poliestireno Expandido (EPS) en diversos factores como la resistencia al fuego, conductividad térmica y resistencia a la compresión de los concretos celulares. El concreto celular y el concreto con espuma de poliestireno fueron diseñados para densidades que van desde 1200 kg/m³ a 150 kg/m³ con un rango de volumen de EPS de 0 a 82.22% y la relación agua-cemento de 0.33. El concreto celular con una densidad de 800 kg/m³ y un volumen de EPS de 0% fue diseñado como referencia para el concreto con poliestireno espumado. Los resultados indicaron que el aumento del volumen de EPS provoca una reducción significativa de la conductividad térmica obteniendo valores de hasta 0.084 W/m·K,

resistencia al fuego de hasta 1450°C sin daños severos y resistencia a la compresión del concreto de 93.6 kg/cm².

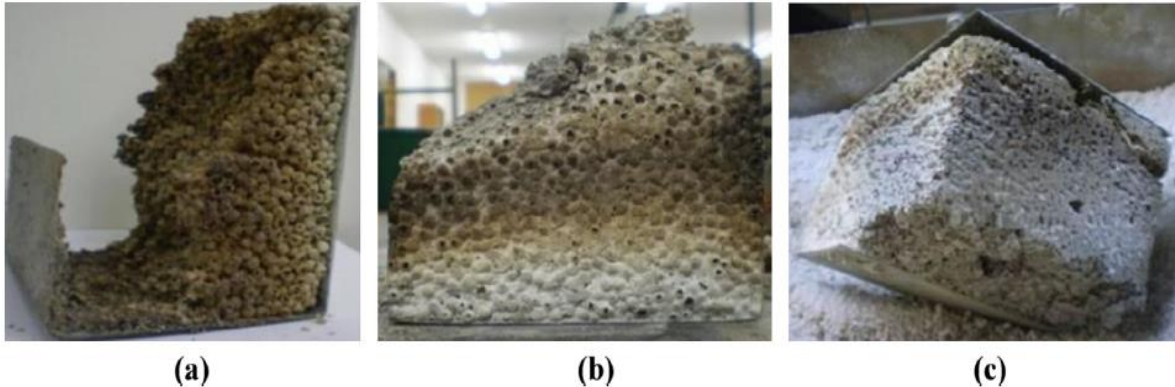


Figura 3. Modos de falla de mortero con EPS a distintas densidades: a) 150 kg/m³, b) 250 kg/m³ y c) 400 kg/m³. Fuente: (Sayadi et al., 2016).

2.4.2 Uso de perlas de EPS en mezclas de mortero y concreto en combinación de humo de sílice.

Babu & Babu (2003) estudiaron el uso de perlas de EPS como agregado ligero en concretos y morteros en combinación de humo de sílice como material cementante suplementario. El principal objetivo del proyecto fue estudiar la resistencia, desempeño y durabilidad de concretos con EPS. Estas mezclas fueron diseñadas con distintos porcentajes de humo de sílice. Las densidades de las distintas mezclas estuvieron en rangos de 1500 a 2000 kg/m³, y se consiguieron resistencias de 100 a 200 kg/cm² respectivamente. La tasa de resistencia ganada para estos concretos mostró que ante el incremento de humo de sílice en las mezclas la resistencia de los especímenes colados a 7 días también incrementa. Lo anterior fue observado en alrededor de 75%, 85% y 95% de la correspondiente resistencia a los 28 días en los niveles de reemplazo humo de sílice de 3%, 5% y 9%, respectivamente. Los resultados de absorción, a 30 minutos y la absorción final, mostró que las mezclas hechas con EPS y arena tuvieron niveles más bajos de absorción comparadas con las mezclas que contenían agregados normales. Además, se observó que la absorción disminuyó cuando se suministró mayor material cementante a la mezcla. El desempeño de estos concretos, en términos

de la permeabilidad a cloruros y resistencia a la corrosión, fue muy bueno incluso para los especímenes con el mínimo contenido de humo de sílice.

2.4.3 Concreto ligero adicionado con EPS.

Kuhail (2001) se encargó de estudiar las características del concreto ligero que consiste en poliestireno, arena, cemento y agua. A través de ese trabajo se ha comprobado que la combinación propuesta por Kuhail es obtener resistencias de hasta 200 kg/cm², con una baja densidad, una trabajabilidad de la mezcla muy alta a una baja relación agua/cemento, en su caso 0.35, y un método de mezclado muy sencillo, relativamente barato y no necesita sistemas complejos de máquinas. Algunas de las aplicaciones que Kuhail le dio a este concreto fueron para componentes estructurales tales como: bloques huecos, losas nervadas, losas de resistencia a las heladas y pendientes de techos; y en elementos no estructurales tales como: paneles de aislamiento térmico y acústico y componentes prefabricados ligeros, así como bloques ligeros para mampostería. Pero las propiedades mecánicas y químicas aún están en discusión con el fin de estudiar el comportamiento del poliestireno en diferentes ambientes (es decir, uso de campo). Esto se puede considerar una nueva línea de investigación para el concreto de peso ligero.

Tabla 1. Rangos con los cuales cumple la denominación de mortero de baja densidad (Kuhail, 2001).

Material	Rango	Observaciones
Cemento hidráulico	200 - 600 kg/m ³	-
Arena	150 - 700 kg/m ³	-
Poliestireno	0.3 - 1.2 m ³ /m ³	Quando la mezcla es compactada hasta a un 70% de su tamaño original, aproximadamente.
Agua/Cemento	0.35 - 0.45	Sin mezcla posible más allá de este rango.

En la tabla 1 se muestra los materiales y sus rangos con los cuales se elaboraron las mezclas.



Figura 4. Modos de falla de bloques de mortero adicionado con poliestireno expandido, densidad de 1500 kg/m^3 . Fuente: (Kuhail, 2001).

2.4.4 Fabricación de piezas de mampostería de baja densidad con material reciclado de EPS.

Hernández-Zaragoza *et al.*, (2013) trabajaron en la fabricación de tabiques de baja densidad de dimensiones de $10 \times 20 \times 6$ cm dónde se utilizó cemento portland, agua y material reciclado de poliestireno, los resultados fueron que los tabiques desarrollados en la investigación demostraron tener propiedades mecánicas eficientes y que podría ser utilizado como elemento de mampostería en la construcción ya que este material cumple con los parámetros requeridos en elementos de mampostería en México. Las piezas se componen de EPS reciclado como agregado comercial y de cemento Portland como aglutinante. A diferencia de la mayoría de los trabajos publicados en la literatura, este mortero no utilizó puzolanas, aditivos o agregados adicionales.

A diferencia del concreto (con agregado grueso), las trayectorias de falla siempre siguen las interfaces de las partículas de agregado de poliestireno y se cortan a través de la pasta de cemento y de las propias partículas de agregado.

Las grietas en los tabiques de poliestireno son similares a las grietas de concreto reportados en la prueba de compresión y tensión.



Figura 5. Grietas resultantes en el tabique después de prueba de compresión.

Fuente: (Hernández-Zaragoza et al., 2013).



Figura 6. Grietas resultantes en el tabique después de prueba de tensión. Fuente:

(Hernández-Zaragoza et al., 2013).

El uso sustentable de EPS en tabiques de concreto celular fue muy favorable con respecto a las existentes en el mercado. El material obtenido fue más ligero, lo que facilita su rápida elaboración, control de calidad y transporte.

Su producción es más sencilla y el producto final es menos permeable, lo que ayuda a evitar que la formación de humedad afecte su resistencia debido a la mayor adherencia mostrada con poliestireno seco. Además, es más resistente y flexible, lo que hace que los muros sean menos vulnerables al agrietamiento causados por los movimientos del terreno. Por último, este material es más barato, ya que utiliza materiales reciclados y tiene propiedades que impiden su deterioro así aumentando su vida útil. Se recomienda el uso de EPS completamente seco para obtener las mejores propiedades de las piezas finales (Hernández-Zaragoza et al., 2013).

Tabla 2. Propiedades comparativas de muestras A y B en comparación con los parámetros reportados (Hernández-Zaragoza et al., 2013).

Propiedad	Tabique A	Tabique B	Tabique de arcilla cocida	Tabique de mortero
Dimensiones: espesor, ancho y longitud (cm)	6, 10, 20	6, 10, 20	5.5, 11.5, 23	18, 12, 38
Peso volumétrico (kg/m ³)	1568	1236	1580	1890
Porcentaje promedio de absorción (%)	9.3	4.3	17.8	25.2
Esfuerzo a la compresión (MPa)	9.69	6.92	11.16	4.69
Esfuerzo promedio de ruptura (MPa)	2.94	1.65	0.755	0.794

2.4.5 Desarrollo de un nuevo proceso de reciclaje de residuos de EPS.

Kan & Demirboğa (2009a) desarrollaron un nuevo proceso de reciclaje de los residuos de espumas de EPS mediante el uso de tratamiento térmico sometiendo el material a elevadas temperaturas en un horno eléctrico y moldeando especímenes. Esta técnica reduce el volumen de residuos de EPS cerca de 20 veces de la original. Antes del tratamiento térmico, la densidad media, conductividad térmica y resistencia a la compresión de residuos de espumas de EPS eran 10 kg/m³, 0.0368W/m·K y 1.22 Kg/cm², respectivamente. El mejor resultado de la modificación se determinó a 130 °C y 15 min. Después de la

modificación, la densidad, la conductividad térmica y la resistencia a la compresión de los residuos de EPS, aumentó a 217 kg/m^3 , $0.0555 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y 84.53 Kg/cm^2 , respectivamente. Este nuevo material, que se obtiene después del tratamiento térmico, se llama Residuos Modificados de Poliestireno Expandido (RMPE).

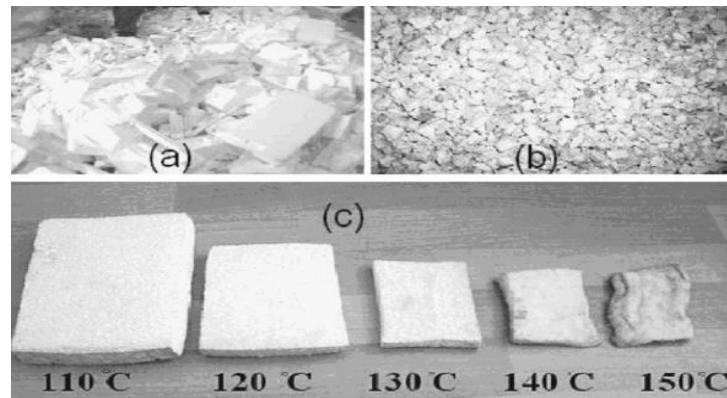


Figura 7. a) Desechos de PE, b) agregado de RMPE, c) RMPE después de tratamiento térmico. Fuente: (Kan & Demirboğa, 2009a).

2.4.6 Residuos Modificados de Poliestireno Expandido (RMPE) como agregado potencial en concretos ligeros.

En otro trabajo realizado por Kan *et al.* (2009b) este presenta los resultados de un estudio experimental sobre los efectos del uso de RMPE usado como un agregado potencial en concretos ligeros. En este estudio, se obtuvieron RMPE mediante procesos térmicos y se utilizaron como agregado. Los RMPE se obtuvieron por el método de tratamiento térmico manteniendo residuos de EPS en un horno eléctrico a $130 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 15 min. Para este propósito, se prepararon seis series de muestras de concreto. Los agregados de RMPE fueron utilizados como un reemplazo de agregado natural, en niveles de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% en volumen. La densidad de RMPE es mucho menor que la de agregados naturales; por lo que el concreto resultante se convierte en un concreto ligero con una densidad aproximada de 900 a $1,700 \text{ kg/m}^3$. La resistencia obtenida a los 28 días de los especímenes colados del concreto con RMPE fue de 130 kg/cm^2 a 230 kg/cm^2 aproximadamente, siendo esto un resultado positivo ya que satisface el requisito de resistencia del concreto ligero semiestructural.

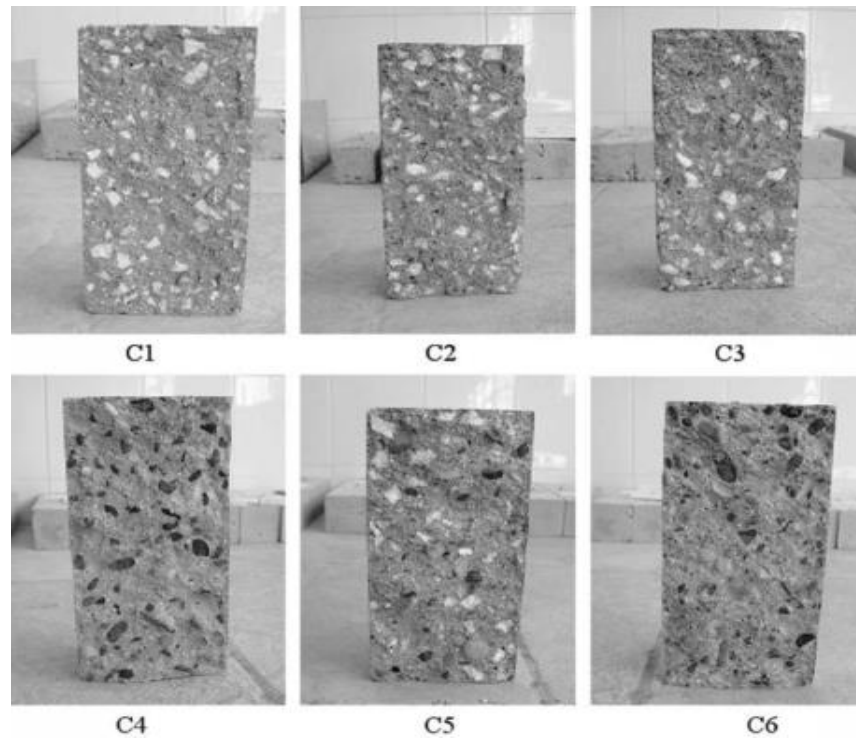


Figura 8. Modos de falla por separación de muestras de concreto con agregados de RMPE. Fuente: (Kan & Demirboğa, 2009b)

2.4.7 Variación de la resistencia en concretos ligeros adicionados con EPS.

En el año 2002 en un estudio realizado en Babylon University College of Engineering, se investigaron algunas de las propiedades mecánicas del concreto con poliestireno, por métodos destructivos y no destructivos. Los resultados experimentales de la prueba no destructiva se correlacionaron con la resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, resistencia a la flexión, resistencia al impacto y patrones de agrietamiento. El resultado del ensayo mostró que las propiedades mecánicas del concreto mejoran con la adición de EPS hasta una relación de 1/3 (porcentaje de cemento/poliestireno). Por otro lado, se notó que el aumento de EPS en la proporción de cemento aumenta la resistencia a flexión y la resistencia a la abrasión para el concreto (Mansour & Mohammed, 2002).

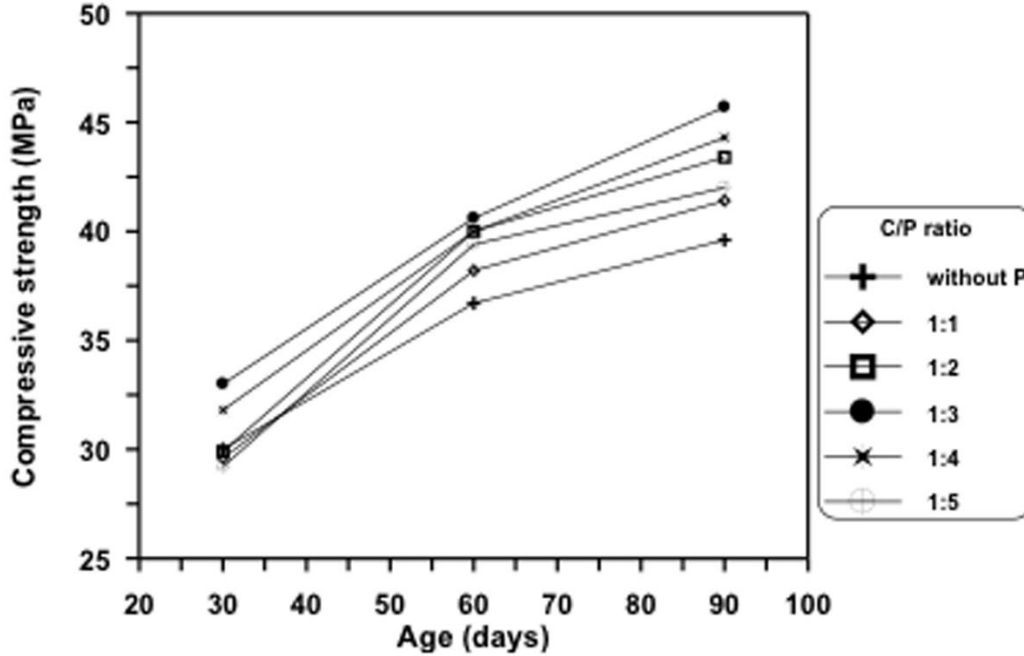


Figura 9. El efecto de EPS en la resistencia a la compresión del concreto a diferentes edades. Fuente: (Mansour & Mohammed, 2002).

2.4.8 Desarrollo de un material termoaislante ligero a base de EPS.

En un estudio realizado en Vilnius, Lituania; se utilizaron residuos de espuma de EPS, así como residuos finos y gruesos de EPS y partículas finas sopladas de EPS; para producir el material de relleno de un compuesto termoaislante ligero, de los cuales la matriz es un cementante base EPS. La investigación de la zona de contacto entre el cementante base EPS y los gránulos de EPS mostró que no se presentan fracturas o microfisuras. La adherencia de los dos componentes depende del tamaño y la forma de los gránulos utilizados. Cuando un gránulo de poliestireno es arrancado del cementante base EPS, el agujero creado repite la estructura del gránulo como si fuera un molde y el gránulo deja residuos de poliestireno en el agujero. Esto demuestra el hecho de que el cementante base EPS tiene una zona de contacto más fuerte que el material de poliestireno del gránulo. Cuando se utilizan gránulos finos de EPS, estos se desintegran a lo largo de la zona de contacto. Dicho material tiene una fuerza de adhesión más baja, sin

embargo, es más fuerte en comparación con un material compuesto, hecho con diferentes gránulos de espuma de EPS, previstas de una mejor macroestructura. La fuerza y la conductividad térmica del material compuesto depende de su densidad, la mezcla de la matriz, su arreglo y la cantidad utilizada, todo esto se definió por medio de ecuaciones de regresión (Laukaitis, Zurauskas, & Kerien, 2005).

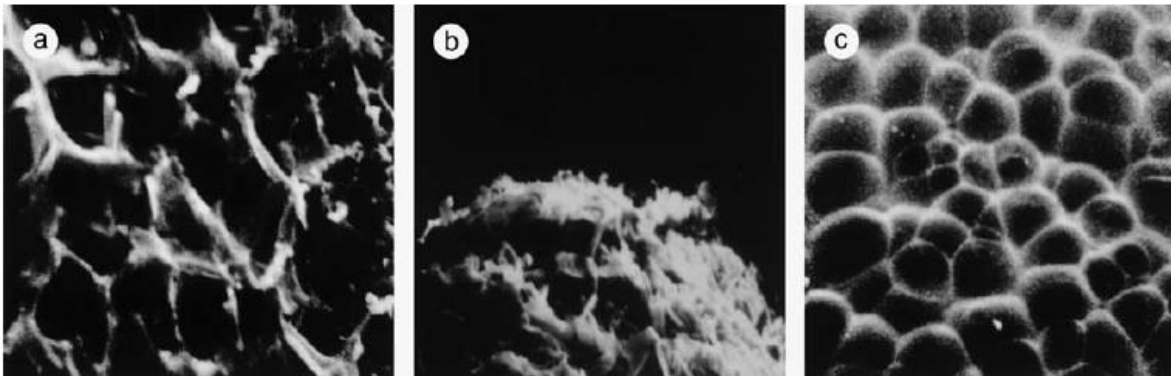


Figura 10. Microestructura de gránulo de poliestireno (X120): a) partícula grande, b) partícula desmoronada, c) partícula fina. Fuente: (Laukaitis et al., 2005).

2.4.9 Desarrollo de paneles aislantes a base de materiales reciclados, entre ellos EPS.

El aislamiento es uno de los métodos más efectivos para reducir el consumo de energía tanto en calefacción como en refrigeración de edificios. La selección de los materiales correctos y la determinación del espesor de aislamiento óptimo en la aplicación de aislamiento para edificios es un problema importante. Además, es importante utilizar materiales aislantes verdes para limitar el impacto medioambiental en el uso de estas soluciones. Un creciente interés se centra en la incorporación de materiales reciclados de bajo costo en productos de construcción y su posible uso como paneles aislantes tanto para edificios nuevos como para remodelaciones. En el trabajo realizado por (Ricciardi, Belloni, & Cotana, 2014) se investigaron dos paneles, compuestos por papel usado, EPS y fibras textiles, unidos con pegamento, con un espesor total de 12 y 20 mm respectivamente. El

estudio se centra en la caracterización térmica y acústica de los paneles, a fin de proporcionar datos precisos para una integración de edificios confiable. El rendimiento térmico se evaluó utilizando el aparato de caja caliente, de acuerdo con la norma UNI EN ISO 8990.

Se encontró un buen comportamiento térmico para todos los paneles desarrollados: los valores k varían en el rango 0.034-0.039 W/mK. Los paneles desarrollados podrían ser una solución válida en lugar de los sistemas clásicos de aislamiento, aunque la resistencia térmica está fuertemente influenciada por la humedad ambiental, la velocidad de la compresión y la presencia de aire entre las capas. Por lo tanto, durante las mediciones también se utilizó una cámara térmica infrarroja, con el objetivo de investigar los puntos débiles de los paneles ensamblados y seleccionar las posiciones de los sensores. El coeficiente de absorción acústica se determinó por medio de un tubo de Kundt, de acuerdo con la norma ISO 10534-2. El coeficiente de reducción de ruido (CRR, el valor aritmético del coeficiente de absorción en las frecuencias 250, 500, 1000 y 2000 Hz) de las muestras varía en el rango 0.23-0.38, dependiendo del espesor de la capa. Finalmente, se consideró una evaluación inicial del ciclo de vida de las soluciones propuestas y se comparó con el rendimiento de otros materiales aislantes reemplazables. Los resultados mostraron que el panel compuesto por papeles reciclados y fibras textiles causa un consumo de energía relativamente grande y un alto potencial de calentamiento global. La importancia de este tipo de sistema de aislamiento se debe al uso de materiales reciclados: tanto el papel usado como las fibras de TNT deben eliminarse mediante un gran uso de energía. De esta forma, se reutilizarán y el costo de producción de los paneles será muy bajo. Una desventaja de estos paneles podría ser su alta densidad (alrededor de 433 kg / m³): el paso futuro para este trabajo será la mejora de este nuevo tipo de aislamiento con el fin de obtener una solución competitiva en el mercado. La fabricación de soluciones más livianas permitirá que los paneles sean más competitivos en el mercado en términos de energía incorporada y emisiones de gases de efecto invernadero.



Figura 11. Estructura interna de los paneles fabricados con cartón reciclado – PE y fibras textiles. Fuente: (Ricciardi et al., 2014).

2.4.10 Sustitución de fenolita por poliestireno líquido para el desarrollo de tarjetas de circuitos integrados.

Schmidt, Cioffi, Voorwald, & L (2011) realizaron un trabajo acerca del EPS reciclado a través de la fusión y/o disolución de este material en acetona como disolvente y fue usado para la producción/fabricación de tableros de circuitos integrados. El material obtenido se caracterizó mediante pruebas de flexión de acuerdo con la norma ASTM D 790 y los resultados se compararon con fenolita, utilizado tradicionalmente. Se observaron fracturas de los especímenes por microscopía electrónica de barrido con el fin de establecer patrones. El EPS como la fenolita fueron analizados térmicamente mediante Análisis Termogravimétrico (ATG) y Calorimetría Diferencial de Barrido (CDB). El método que se utilizó para la disolución dio como resultados materiales muy frágiles. El método usado de fusión no mostró la formación de huecos ni aumentó la fragilidad del material. El EPS reciclado presenta un valor de resistencia significativamente menor que el de la fenolita, esto es una reducción cercana a 60% de su resistencia a flexión. De esto se puede concluir que por sí solo, el poliestireno líquido laminado y endurecido, no tiene buenas propiedades a flexión.



Figura 12. Poliestireno Líquido endurecido usado como sustituto de fenolita en la fabricación de tarjetas de circuitos electrónicos. Fuente: (Schmidt et al., 2011).

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se realizarán pruebas en el laboratorio para obtener algunas propiedades físicas y mecánicas de los materiales y especímenes que se ensayaron a lo largo de esta investigación. Para ello se tendrá que realizar la caracterización y diseño de mezcla de concreto y mortero, así como de cada dosificación que se realice. Con ello al final se podrá observar cuál de las mezclas es la que tiene las mejores propiedades buscadas que son una buena resistencia y manejabilidad, además como ya se mencionó en el capítulo anterior, se espera que las mezclas que contienen el Polímero Sustentable sean de menor densidad que las mezclas convencionales a base de cemento hidráulico.

Al realizar nuestras pruebas de laboratorio tenemos que tener en cuenta la forma en que se realiza cada una de éstas, así como las condiciones y las características de los materiales, la forma que éstos se añaden a la mezcla y el comportamiento que tienen al momento de entrar en contacto unos con otros. La facilidad y la manejabilidad para realizar las mezclas serán muy importante para determinar si es un producto que se pueda llevar a la industria de la construcción, así como su bajo costo.

Las pruebas experimentales se desarrollarán bajo las normas y los reglamentos establecidos por las ASTM, ONNCCE Y NTC-2004, utilizando en cada una de las pruebas el equipo manual y mecánico estandarizado dentro de dicho reglamento y que se encuentra en el laboratorio de mecánica de suelos.

3.1 Trabajo experimental.

La etapa experimental se llevó a cabo en 3 etapas, las cuales son:

- Trabajos previos a la experimentación.
- Etapa general.
- Etapa final.

Y se describen a continuación.

3.1.1 Trabajos previos a la experimentación.

3.1.1.1 Recolección de material.

Las espumas de EPS, al momento de ser depositados en los contenedores de residuos sólidos, muestran tamaños y formas que dificultan su integración y manejo en elementos constructivos; más aún que en nuestro caso se procedió a diluirlo en una mezcla de solventes como lo son acetona y acetato de etilo. Aquí el material tuvo que ser modificado de cómo se obtuvo primeramente para su aprovechamiento en esta investigación. Cabe mencionar que los residuos en el caso del polímero se obtuvieron de materiales de deshecho como son: residuos de embalaje de aparatos electrodomésticos principalmente, desperdicio de bovedilla ligera usada en la construcción, entre otros.

La alternativa más viable para la transformación del material fue la disgregación de los bloques o placas de EPS mediante un método manual.

Durante los preparativos hacia la experimentación se plantearon dudas acerca de la viabilidad de esta alternativa, de entre ellas dos sobresalieron por su importancia:

Una vez recolectados los residuos de poliestireno ¿qué tan viable es procesar el material manualmente hasta obtener fragmentos que sean manejables fácilmente? Y dado que si se usan residuos más pequeños ¿en qué afecta el tamaño y peso de las partículas?

Se considera que, dada la escasa información disponible, la mejor manera de responder a esas preguntas sería a través del trabajo directo sobre los residuos por lo cual se decidió practicar un experimento, mismo que se describe a continuación.

En cuanto a los agregados usados en las mezclas, la grava se obtuvo de la Planta de Asfalto y Trituración “La Cañada” perteneciente al Corporativo AG y ubicada en la carretera Querétaro – Tequisquiapan km. 10; la arena se obtuvo de un banco ubicado en las cercanías de la localidad de Saldarriaga, El Marques; Querétaro.

Se obtuvo el suficiente material para desarrollar y dar término a esta investigación.

3.1.1.2 Procesado del material polimérico (EPS).

Este pequeño paso consiste en disgregar los residuos de espuma de EPS hasta reducirlos a fragmentos pequeños que posteriormente serán diluidos en una mezcla de acetona y acetato de etilo en proporción uno a uno de solvente. Es importante lavar el material, o bien que este se encuentre limpio, seco y libre de polvo e impurezas antes de comenzar a cortarlo en pequeños fragmentos.

El procesado del material se puede hacer manualmente y/o ayudado de un cuchillo o espátula, de manera que los fragmentos tengan un tamaño aproximado de 4 a 6 cm de diámetro.



Figura 13. Residuos de espuma de EPS obtenidos de desperdicio de empaques y embalajes (Fuente propia).



Figura 14. Espuma de EPS en fragmentos de 4 a 6 cm de diámetro listo para disolución (Fuente propia).

3.1.1.2.1 Materiales y procedimiento.

3.1.1.2.2 Materiales.

Debido a las características del procesado del poliestireno que se usará durante el desarrollo de la experimentación hay algunos aspectos en los cuales se debe de poner énfasis, tales como:

- La limpieza
- El tamaño de los fragmentos
- Proporciones de las mezclas

El único conocimiento que se tiene del material es que los residuos tienen procedencia de materiales para embalaje de aparatos electrodomésticos

principalmente, desperdicio de bovedilla ligera usada en la construcción, artículos de cómputo, entre otros.

3.1.1.2.3 Equipo utilizado.

Para el procesado del EPS se utilizó el siguiente equipo:

- Cuchillo y/o espátula de cuchillo.
- Charola metálica de 40 X 60 cm.
- Vaso de precipitado de 1 L.
- Probeta de 1000 ml.
- Agitador electromagnético.
- Varilla punta de bala de ¼”.

3.1.1.3 Caracterización de agregados.

Con la intención de tener mezclas lo más homogéneas posibles y conocer la granulometría de los materiales utilizados, se realizaron una serie de pruebas a los agregados; tales como:

- La obtención de las humedades de los materiales en su estado original para determinar la cantidad de agua a agregar.
- La determinación del peso volumétrico seco suelto y peso volumétrico seco compacto, determinando el peso de los materiales en un recipiente de volumen conocido y estableciendo las relaciones correspondientes.
- La elaboración de las curvas granulométricas, las cuales describen la sucesión de tamaños de los agregados, esto se llevó a cabo con distintas mallas, cribando el material en orden descendente y registrando los pesos de los materiales retenidos en cada una de las mallas, esto para determinar los coeficientes de uniformidad y curvatura.

3.1.1.3.1 Caracterización de la grava.

- Humedad de la grava.

En el caso de la grava obtenida para la realización del experimento a lo largo de este documento se trató de una grava producto de roca basalto, se procedió a tomar una muestra de 500 g (W_m) para posteriormente llevarla al horno de secado donde permaneció ahí durante 24 horas, después se sacó del horno para obtener su peso seco (W_s) = 496.0 g y obtener la humedad con la siguiente ecuación:

$$w(\%) = \frac{W_m - W_s}{W_s} \times 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

$$w(\%) = \frac{500 \text{ g} - 496 \text{ g}}{496 \text{ g}} \times 100$$

$$w(\%) = \mathbf{0.806}$$

- Determinación del peso volumétrico seco suelto.

Se procedió a cuartear el material. En forma representativa se tomó el material con un cucharón del centro de la muestra hacia afuera, con una brocha se recogieron los finos para posteriormente depositar el material en un recipiente con altura de caída de 0.0 cm. Se llenó hasta el nivel de derrame procurando esparcir el material también por las orillas.

Se enrasa la grava con la mano compensando los huecos con las salientes y se pesó el recipiente con el material. Este procedimiento se realizó 3 veces con el fin de tener al menos tres datos. Se debe repetir la prueba si la diferencia excede de 30.0 kg/m³ el peso volumétrico obtenido en la grava entre el valor mayor y el valor menor; para la arena la tolerancia será de 10 kg/m³ entre el valor mayor y el valor menor.

Tabla 3. Pesos volumétricos secos sueltos de la grava utilizada en el experimento.

Peso recipiente más material (kg)	Peso recipiente (kg)	Peso material (kg)	Vol. del recipiente (lt)	P. V. S. (kg/m ³)	w (%)	P. V. S. S. (kg/m ³)
18	3.83	14.17	9.98	1419.84	0.806	1408.49
17.8	3.83	13.97	9.98	1399.80	0.806	1388.61
18.1	3.83	14.27	9.98	1429.86	0.806	1418.43
PROM						1405.17

- Determinación del peso volumétrico seco compacto.

En forma representativa se tomó el material con el cucharón del centro de la muestra hacia afuera y se depositó en el recipiente distribuyendo el material de manera uniforme, el llenado se hace hasta el 1/3 del volumen del recipiente. Seguido de lo anterior se aplican 25 golpes con una varilla punta de bala de 5/8" de diámetro, distribuidos en toda el área, la velocidad de aplicación de golpes debe ser moderada (ni muy rápidos, ni muy lentos). Se llena a 2/3 partes del volumen del recipiente, se aplican nuevamente 25 golpes con la varilla punta de bala distribuidos en toda el área, sin penetrar la primera capa. Posteriormente se llena hasta el nivel de derrame y se aplican los 25 golpes como se indicó en los pasos anteriores.

Se enrasa, en la grava, con la yema de los dedos sin hacer presión, compensando los huecos llenándolos de grava. Se pesa el recipiente con el material. Y se sigue el mismo criterio que en el cálculo del peso volumétrico seco suelto.

Tabla 4. Pesos volumétricos secos compactos de la grava utilizada en el experimento.

Peso recipiente más material (kg)	Peso recipiente (kg)	Peso material (kg)	Vol. del recipiente (lt)	P. V. S. (kg/m ³)	w (%)	P. V. S. C. (kg/m ³)
19.4	3.83	15.57	9.98	1560.12	0.806	1547.65
19.7	3.83	15.87	9.98	1590.18	0.806	1577.47
19.6	3.83	15.77	9.98	1580.16	0.806	1567.53
PROM						1564.21

- Curva granulométrica de la grava.

Para esta parte se tomó una muestra de 4 kg y se cribó el material pasándolo por las mallas con abertura de 1", 3/4", 1/2" y 3/8", además de la malla 4 (4.75 mm), pesando las fracciones de material retenidas en cada una de las mallas y también el material que pasó la malla 4. Lo anterior se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 5. Porcentaje de grava retenido en mallas.

Malla no.	Abertura nom. malla (mm)	Peso retenido parcial (g)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% que pasa
1"	25	40	1.00%	1.00%	99.00%
3/4"	19	888	22.20%	23.20%	76.80%
1/2"	12.5	1818	45.45%	68.65%	31.35%
3/8"	9.5	580	14.50%	83.15%	16.85%
No. 4	4.75	652	16.30%	99.45%	0.55%
Pasa No. 4		16	0.40%	99.85%	0.15%
Suma		3994	100%	--	--

Posteriormente se grafican los valores obtenidos en la tabla anterior

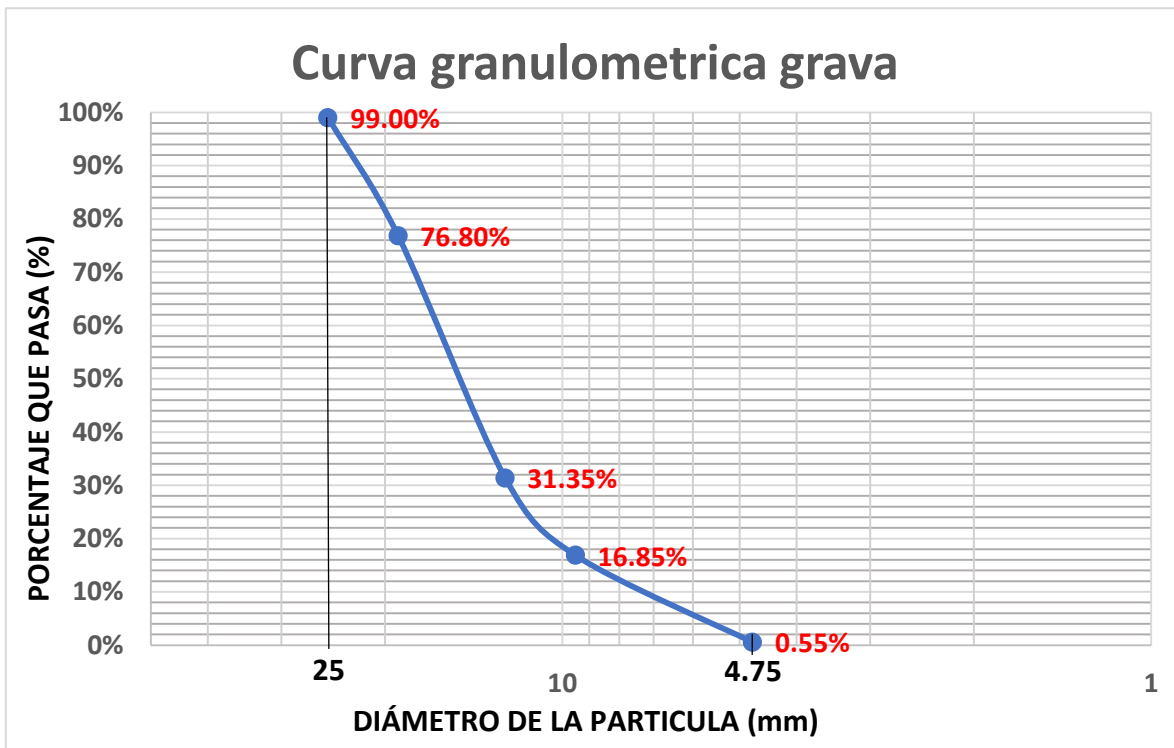


Figura 15. Gráfico de curva granulométrica de grava empleada en el experimento.

La gráfica granulométrica suele dibujarse con porcentajes como ordenadas y tamaños de las partículas como abscisas. Las ordenadas se refieren a porcentaje, en peso, de las partículas menores que el tamaño correspondiente. La representación en escala semilogarítmica (eje de abscisas en escala logarítmica) resulta preferible a la simple representación natural, pues en la primera se dispone de mayor amplitud en los tamaños finos y muy finos, que en escala natural resultan muy comprimidos, usando un módulo práctico de escala.

Como una medida simple de la uniformidad de un suelo, Allen Hazen propuso el coeficiente de uniformidad:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Ec. (2)}$$

En donde:

D_{60} : Tamaño tal, que el 60%, en peso, del suelo, sea igual o menor.

D_{10} : Llamado por Hazen diámetro efectivo; es el tamaño tal que sea igual o mayor que el 10%, en peso, del suelo.

En realidad, la relación $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ es un coeficiente de no uniformidad, pues su valor numérico decrece cuando la uniformidad aumenta. Los suelos con $C_u < 3$ se consideran muy uniformes; aun las arenas naturales muy uniformes rara vez presentan $C_u < 2$.

Como dato complementario, es necesario para definir la graduación, se define el coeficiente de curvatura del suelo con la expresión:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60})(D_{10})} \quad \text{Ec. (3)}$$

D_{30} se define análogamente que los D_{10} y D_{60} anteriores. Esta relación tiene un valor entre 1 y 3 en suelos bien graduados, con amplio margen de tamaños de partículas y cantidades apreciables de cada tamaño intermedio.

Existen mallas básicas las cuales nos permiten diferenciar gravas, arenas y finos, dentro de las cuales están la malla de 3 pulgadas, la malla número 4 (4.76 mm) y la malla número 200 (0.075 mm). Aquel material retenido en la malla no. 4

se considera grava, el material que pasa la malla no. 200 se consideran finos y el material ubicado entre las dos mallas anteriores se consideran como arenas (Juárez-Badillo & Rico-Rodríguez, 2005).

Bajo los conceptos mencionados en los párrafos anteriores, de la curva granulométrica se puede apreciar aproximadamente los siguientes diámetros requeridos:

- $D_{60} = 10.7 \text{ mm}$.
- $D_{30} = 10.1 \text{ mm}$.
- $D_{10} = 7.2 \text{ mm}$.

Y se tienen los coeficientes de curvatura y uniformidad siguientes:

$$C_c = \frac{(10.1 \text{ mm})^2}{(10.7 \text{ mm})(7.2 \text{ mm})} = 1.32$$

$$C_u = \frac{10.7 \text{ mm}}{7.2 \text{ mm}} = 1.48$$

Tabla 6. Coeficientes de uniformidad y curvatura (Juárez-Badillo & Rico-Rodríguez, 2005).

Clasificación	Coefficiente de Uniformidad	Coefficiente de curvatura
Arena bien graduada	$C_u \geq 6$	$1 \leq C_c \leq 3$
Grava bien graduada	$C_u \geq 4$	$1 \leq C_c \leq 3$

Comparando los valores obtenidos de los coeficientes de curvatura y uniformidad con los parámetros establecidos en la tabla 6 se puede concluir que la grava usada en la experimentación es una **grava mal graduada**.

3.1.1.3.2 Caracterización de la arena.

- Humedad de la arena.

En el caso de la arena obtenida para la realización del experimento a lo largo de este documento se trató de una arena de mina, y primeramente se procedió a tomar una muestra de 400 g (W_m) para posteriormente llevarla al horno de secado donde permaneció ahí durante 24 horas, después se sacó del horno para obtener su peso seco (W_s) = 384.5 g y obtener la humedad con la ecuación 1 mostrada en el apartado anterior:

$$w(\%) = \frac{400 \text{ g} - 384.5 \text{ g}}{384.5 \text{ g}} \times 100$$

$$w(\%) = 4.03$$

- Determinación del peso volumétrico seco suelto.

Se procedió a cuartear el material. En forma representativa se tomó el material con un cucharón del centro de la muestra hacia afuera, con una brocha se recogieron los finos para posteriormente depositar el material en un recipiente con altura de caída de 0.0 cm. Se llenó hasta el nivel de derrame procurando esparcir el material también por las orillas.

Se enrasó la arena con una regla metálica (enrasador) y se pesó el recipiente con el material. Este procedimiento se realizó 3 veces con el fin de tener al menos tres datos. Se debe repetir la prueba si la diferencia excede de 10 kg/m³ entre el valor mayor y el valor menor.

Tabla 7. Pesos volumétricos secos sueltos de la arena utilizada en el experimento.

Peso recipiente más material (kg)	Peso recipiente (kg)	Peso material (kg)	Vol. del recipiente (lt)	P. V. S. (kg/m ³)	w (%)	P. V. S. S. (kg/m ³)
5.84	2	3.84	2.998	1280.85	9.05	1174.56
5.87	2	3.87	2.998	1290.86	9.05	1183.73
5.86	2	3.86	2.998	1287.53	9.05	1180.67
PROM						1179.65

- Determinación del peso volumétrico seco compacto.

En forma representativa se tomó el material con el cucharón del centro de la muestra hacia afuera y se depositó en el recipiente distribuyendo el material de manera uniforme, el llenado se hace hasta el 1/3 del volumen del recipiente. Seguido de lo anterior se aplican 25 golpes con una varilla punta de bala de 5/8" de diámetro, distribuidos en toda el área, la velocidad de aplicación de golpes debe ser moderada (ni muy rápidos, ni muy lentos). Se llena a 2/3 partes del volumen del recipiente, se aplican nuevamente 25 golpes con la varilla punta de bala distribuidos en toda el área, sin penetrar la primera capa. Posteriormente se llena hasta el nivel de derrame y se aplican los 25 golpes como se indicó anteriormente.

Se enrasa nuevamente con la regla metálica. Se pesa el recipiente con el material. Y se sigue el mismo criterio que en el cálculo del peso volumétrico seco suelto.

Tabla 8. Pesos volumétricos secos compactos de la arena utilizada en el experimento.

Peso recipiente más material (kg)	Peso recipiente (kg)	Peso material (kg)	Vol. del recipiente (lt)	P. V. S. (kg/m ³)	w (%)	P. V. S. C. (kg/m ³)
6.79	2	4.79	2.998	1597.73	9.05	1465.14
6.83	2	4.83	2.998	1611.07	9.05	1477.37
6.81	2	4.81	2.998	1604.40	9.05	1471.25
PROM						1471.25

- Curva granulométrica de la arena.

Para esta parte se tomó una muestra de 276.9 g y se cribó el material pasándolo por las mallas no. 4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200; pesando las fracciones de material retenidas en cada una de las mallas y también el material que pasó la malla no. 200. Lo anterior se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 9. Porcentaje de arena retenido en mallas.

Malla no.	Abertura nom. malla (mm)	Peso retenido parcial (g)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% que pasa
4	4.75	16	5.78%	5.78%	94.22%
10	2	43.2	15.60%	21.38%	78.62%
20	0.85	56.3	20.33%	41.71%	58.29%
40	0.425	71.6	25.86%	67.57%	32.43%
60	0.25	24.6	8.88%	76.45%	23.55%
100	0.15	27.2	9.82%	86.28%	13.72%
200	0.075	22.9	8.27%	94.55%	5.45%
Pasa no. 200		12.35	4.46%	99.01%	0.99%
Suma		274.15	99%	--	--

Posteriormente se grafican los valores obtenidos en la tabla anterior

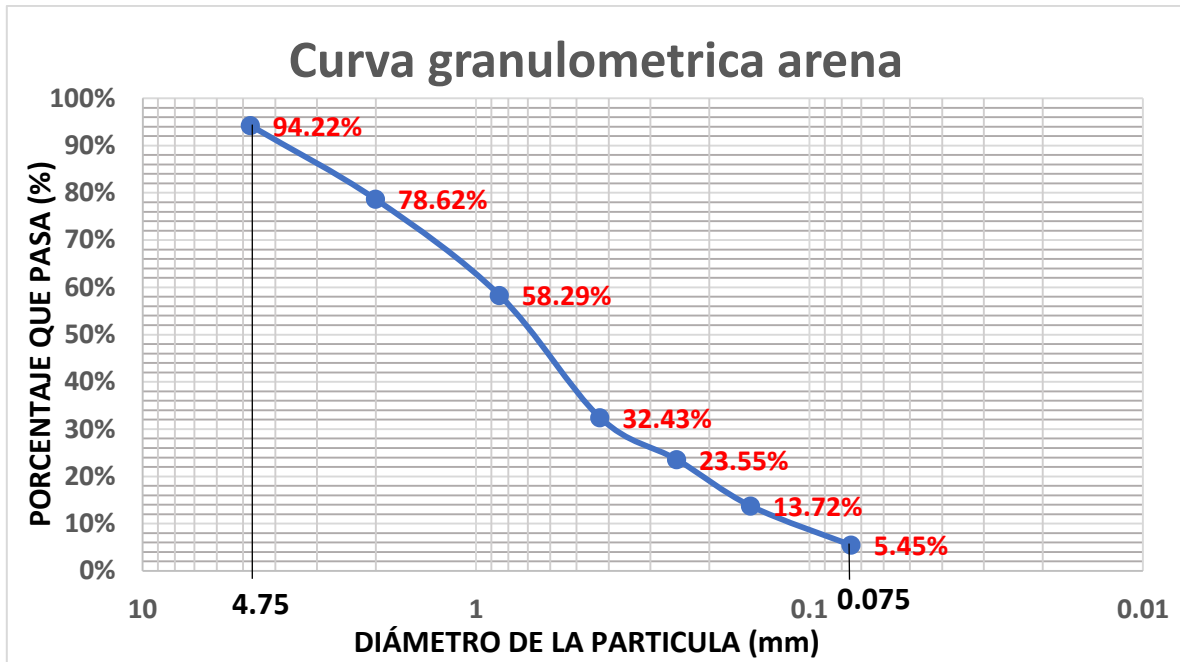


Figura 16. Gráfico de curva granulométrica de arena empleada en el experimento.

Al igual que en el gráfico de la curva granulométrica de la grava se procede a buscar los diámetros requeridos para calcular los coeficientes de curvatura y uniformidad bajo los mismos criterios que se hizo anteriormente.

- $D_{60} = 0.9 \text{ mm}$.
- $D_{30} = 0.4 \text{ mm}$.
- $D_{10} = 0.12 \text{ mm}$.

Y se tienen los coeficientes de curvatura y uniformidad siguientes:

$$C_c = \frac{(0.4 \text{ mm})^2}{(0.9 \text{ mm})(0.12 \text{ mm})} = 1.48$$

$$C_u = \frac{0.9 \text{ mm}}{0.12 \text{ mm}} = 7.5$$

Comparando los valores obtenidos de los coeficientes de curvatura y uniformidad con los parámetros establecidos en la tabla 6 se puede concluir que la arena usada en la experimentación es una **arena bien graduada**.

3.1.2 Etapa general.

Posterior a los trabajos previos se limitó la experimentación general a 6 probetas compuestas en su totalidad de poliestireno líquido (PL) endurecido, 60 probetas divididas en 5 mezclas para el caso de los morteros y 72 probetas para el caso de los concretos divididas en 4 mezclas (12 cilindros y 6 vigas para cada diferente mezcla). Cada conjunto está compuesto por mezclas con características similares en cuanto a: proporción de cementante y cantidad de agua; además del procedimiento de preparación de la muestra. Variando el tiempo de curado y secado en 3, 7, 14 y 28 días.

En esta etapa los especímenes de PL se fabricaron en moldes usados para contracción lineal de arcillas de medidas 2x2x10 cm, las mezclas de mortero se fabricaron en moldes de 5x5x5 cm y, por último; las mezclas de concreto se fabricaron en moldes cilíndricos de 5x10 cm. Todo lo anterior siguiendo los lineamientos establecidos por las normas ASTM y NMX-ONNCCE.

3.1.3 Etapa final.

En esta etapa se analizaron los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la etapa general, los ensayos realizados a las probetas compuestas de PL fueron:

- 1.- Densidad.
- 2.- Absorción en 24 horas.
- 3.- Resistencia a compresión simple.

Los ensayos realizados a los especímenes de mortero fueron:

- 1.- Fluidez.
- 2.- Densidad
- 3.- Absorción en 24 horas.
- 4.- Resistencia a compresión simple.

Por último, los ensayos realizados a los especímenes de concreto

fueron:

- 1.- Peso volumétrico en estado fresco.
- 2.- Densidad.
- 3.- Revenimiento.
- 4.- Absorción en 24 horas.
- 5.- Resistencia a compresión simple.
- 6.- Flexión pura.

3.2 Materiales.

Los materiales empleados en cada una de las mezclas fueron:

3.2.1 Materiales de mezcla para probetas de PL:

- Acetona grado farmacéutico.
- Acetato de etilo grado farmacéutico.
- Poliestireno disgregado (tamaño de 4 a 6 cm de diámetro aproximadamente).

3.2.2 Materiales de mezcla para probetas de mortero:

- PL en diferentes concentraciones (15%, 20% y 25%).
- Cemento Portland CPC (marca Tolteca que cumple con la norma N-CMT-2-02-001-02).
- Arena (que cumple lo establecido en la NMX-111).
- Agua limpia.

3.2.3 Materiales de mezcla para probetas de concreto:

- PL en diferentes concentraciones (15%, 20% y 25%).
- Cemento Portland CPC (marca Tolteca que cumple con la norma N-CMT-2-02-001-02).
- Arena (que cumple lo establecido en la NMX-111).
- Grava (que cumple lo establecido en la NMX-111).

- Agua limpia.

3.3 Equipo.

3.3.1 Equipo manual.

Para realizar las distintas mezclas estudiadas se utilizó el siguiente equipo manual de laboratorio:

- 12 moldes cúbicos de 5 cm por lado, estandarizados por normas ASTM y NMX-ONNCCE.
- 12 moldes cilíndricos de 5x10 cm, estandarizados por normas ASTM y NMX-ONNCCE.
- 9 moldes rectangulares de 4x4x16 cm
- Charolas metálicas para pesado y mezclado de materiales.
- Cucharones de diversos tamaños.
- Espátulas de abanico y de cuchillo.
- Varillas punta de bala de 1/4" y de 5/8".
- Aceite para engrasado de moldes.
- Probeta de 1000 ml.
- Cono de fluidez.
- Cono de revenimiento.
- Cubeta volumétrica.
- Enrasador metálico.
- Flexómetro.
- Mesa de fluidez.
- Base y placa de cabeceo para cilindros de 5x10 cm.
- Vernier analógico.

3.3.2 Equipo eléctrico y mecánico.

Para la realización de las diferentes mezclas se contó empleó con el siguiente equipo eléctrico y mecánico:

- Maquina Universal Tinius Olsen.

- Báscula digital con precisión de ± 0.01 g.
- Báscula mecánica con precisión de ± 1 g.
- Cámara digital de 13 MP de resolución.
- Vernier electrónico.
- Esmeril de banco.

3.4 Elaboración y ensaye de probetas.

En esta sección se explica detenidamente y paso a paso la experimentación y como se realizaron las diferentes pruebas a los especímenes en el laboratorio.

3.4.1 Elaboración de probetas de PL.

En esta primera etapa se elaboraron 6 probetas de PL endurecido para conocer las algunas propiedades de este material como son su densidad, absorción y su resistencia a la compresión. Se siguió la siguiente metodología:

1. Se disgregó el material manualmente y con ayuda del cuchillo en pequeños fragmentos (4 a 6 cm de diámetro aproximadamente).
2. Se agregan los solventes para formar una mezcla homogénea en proporción uno a uno.
3. Posteriormente se comienza a introducir los fragmentos de EPS para su disolución en la mezcla de acetona y acetato de etilo, esto se hace ayudado de la varilla punta de bala para sumergir los fragmentos de EPS. Se agregó EPS hasta que la mezcla se saturó, es decir hasta que el solvente ya no permitió diluir más EPS. Se empleó este método ya que únicamente se necesita obtener poliestireno de manera compacta, con la menor cantidad de aire en su estructura, ya que durante el secado el solvente se volatiliza dejando huecos en la estructura de la pieza colada.
4. Ya disuelto el material, se procedió verter el material en 2 moldes

rectangulares de 2x2x10 cm previamente engrasados y forrados internamente con papel aluminio para evitar posible contacto y adherencia entre el material y el molde.

5. Se dejaron secar las probetas durante 14 días.
6. Posteriormente se desmoldaron y labraron con el esmeril de banco hasta obtener probetas de 12x12x25 mm aproximadamente, esto se hizo con el fin de cumplir la medida estándar de probetas de plásticos rígidos según lo establecido por la norma ASTM D 695 – 02.



Figura 17. Moldes para probetas de PL (Fuente propia).



Figura 18. Probetas de PL endurecido y labrado. Vista frontal (Fuente propia).



Figura 19. Probetas de PL endurecido y labrado. Vista en planta (Fuente propia).

3.4.1.1 Prueba de densidad a probetas de PL.

Esta prueba se realizó en el laboratorio mediante el uso de un vernier electrónico para medir la sección transversal y la altura de cada una de las probetas de PL, posteriormente se pesaron y finalmente la densidad se calculó mediante la ecuación

$$\rho = \frac{W_s}{V} \quad \text{Ec. (4)}$$

En donde:

W_s : Peso de la probeta en estado seco, (kg).

V : Volumen de la probeta, (m^3).



Figura 20. Medición de altura de probeta de PL endurecido (Fuente propia).



Figura 21. Pesado de probeta de PL endurecido (Fuente propia).

3.4.1.2 Prueba de absorción en 24 horas a probetas de PL.

La prueba de absorción consiste en determinar la cantidad de agua absorbida por el espécimen en 24 horas. Según la norma ASTM C 67 - 03 se pesa el espécimen, posteriormente se somete a inmersión total en agua a fría donde permanece durante 24 horas, después se extrae del agua y se seca su superficie; por último, se pesa nuevamente la probeta. La absorción se calcula de manera con la siguiente ecuación:

$$Absorción = \frac{W_{24h} - W_s}{W_s} \times 100 \quad \text{Ec. (5)}$$

En donde:

W_{24h} : Peso del espécimen después de inmersión en agua por 24 horas, (kg).

W_s : Peso del espécimen en estado seco, (kg).



Figura 22. Inmersión de probetas de PL en agua (Fuente propia).

3.4.1.3 Prueba de compresión simple a probetas de PL.

En esta prueba, se ensayaron las probetas a los 10 días de edad. Los especímenes se colocaron sobre un plato de acero y a su vez en cada ensaye se colocó sobre la cara superior del espécimen una rótula para absorber las deformidades que se pudiesen haber presentado. Posteriormente se comenzó con la aplicación de carga. Todo el procedimiento se ejecutó bajo los parámetros de la norma ASTM D 695 – 02. Para obtener la resistencia a compresión de las probetas se utiliza la ecuación 5.

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad \text{Ec. (6)}$$

En donde:

R_c = resistencia a compresión de la probeta, (kgf/cm²).

F_c = carga máxima soportada durante la prueba, (kgf).

S = sección transversal de la probeta, (cm²).



Figura 23. Prueba de compresión simple a probeta de PL (Fuente propia).

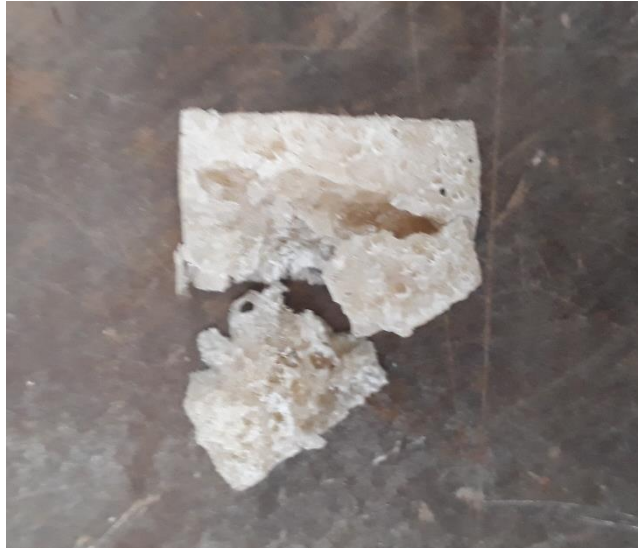


Figura 24. Modo de falla a compresión simple de probeta de PL (Fuente propia).

3.4.2 Elaboración de probetas de mortero.

En esta segunda etapa se elaboraron 60 probetas de mortero a base de arena, cemento portland y PL variando los porcentajes de estos dos últimos. Los ensayos que se llevaron a cabo en estas probetas fueron de fluidez, densidad, absorción en 24 horas y resistencia a la compresión simple. Las proporciones de los materiales empleados se muestran en el capítulo siguiente. Se siguió la siguiente metodología:

1. Se procedió a cribar la arena por la malla #4 con el objetivo de retirar las gravas del material.
2. Posteriormente se pesó la cantidad requerida de cemento y del material cribado se pesó la cantidad requerida de arena.
3. Se midió la cantidad de agua a agregar con la ayuda de una probeta de plástico de 1000 ml.
4. Se engrasaron 12 moldes metálicos cúbicos de 5x5x5 cm para después colar los especímenes.
5. Luego de la preparación de los moldes se procedió a realizar la mezcla.

6. Después de la preparación de la mezcla se realizó la prueba de fluidez.
7. Por último se procedió a colar los 12 especímenes en los moldes, esto se hace en 3 capas, varillando cada capa con 25 golpes distribuidos en la superficie teniendo el cuidado de que no se traspase la capa por completo. Por último, se enrasa. Los cubos permanecieron por 24 horas en los moldes antes de su descimbrado.
8. Después de 24 horas se desmoldaron los cubos de mortero y se midieron sus lados, posteriormente se pesó cada uno de ellos y se sometieron a curado y saturación por inmersión total en agua en el cuarto húmedo del laboratorio, donde permanecieron hasta momentos antes de su ensaye correspondiente.



Figura 25. Pesado de cemento Portland (Fuente propia).



Figura 26. Mezcla arena-cemento-agua (Fuente propia).



Figura 27. Mezcla arena - PL (Fuente propia).



Figura 28. Probetas de mortero, distintas mezclas (Fuente propia).

3.4.2.1 Prueba de fluidez.

La dosificación para mortero, así como la relación agua/cemento se obtuvo de la tabla 2.2 de la sección 2.5.2 de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería. Y se realizó la prueba de fluidez bajo la norma ASTM C1437.



Figura 29. Herramienta para realizar prueba de fluidez (Fuente propia).

Esta prueba consiste en colocar el cono sobre la mesa de fluidez, colocar una capa de mortero y apisonarlo con 25 golpes de la varilla, esto se debe de hacer en 3 capas hasta llegar a la superficie superior del cono y enrasar. Posteriormente se retira el cono de fluidez y en la mesa de fluidez se aplican 25 golpes para que la muestra de mortero se expanda, se termina el ensayo midiendo el diámetro final de la masa de mortero. La fluidez se calcula por medio de la ecuación siguiente:

$$Fluidez = \frac{D_p - D_i}{D_i} \times 100 \quad \text{Ec. (7)}$$

En donde:

D_p = Diámetro promedio de cuatro mediciones realizadas, (cm).

D_i = Diámetro inferior inicial de la pasta de mortero, (cm).

La fluidez requerida depende del uso que se le dé a la mezcla de mortero, el mortero usado para pegar piezas debe de tener una fluidez de 105% a 130% y el mortero usado para relleno una fluidez de 125% a 130%. Cabe mencionar que en algunos casos esta prueba se sustituye en campo por la prueba de revenimiento con el fin de tener una idea clara en campo sobre la trabajabilidad de las mezclas.



Figura 30. Masa de mortero en el cono y mesa de fluidez (Fuente propia).



Figura 31. Masa de mortero expandida después del ensayo de fluidez (Fuente propia).

3.4.2.2 Prueba de densidad a probetas de mortero.

Esta prueba se realizó de igual manera que para las probetas de PL en el laboratorio mediante el uso de un vernier electrónico para medir la sección transversal y la altura de cada uno de los especímenes de mortero, posteriormente se pesaron y finalmente la densidad se calculó mediante la ecuación 4 mostrada en la sección 3.4.1.1; esto es dividir el peso de la probeta entre el volumen obtenido.



Figura 32. Medición de cubo de mortero (Fuente propia).



Figura 33. Pesado de cubo de mortero arena-cemento (Fuente propia).

3.4.2.3 Prueba de absorción en 24 horas a probetas de mortero.

La prueba de absorción consiste en determinar la cantidad de agua absorbida por el espécimen en 24 horas. Según la norma ASTM C 67 - 03 se pesa el espécimen, posteriormente se somete a inmersión total en agua a fría donde permanece durante 24 horas, después se extrae del agua y se seca su

superficie; por último, se pesa nuevamente la probeta. La absorción se calcula de igual manera con la ecuación 5 mostrada en el apartado 3.4.1.2.



Figura 34. Inmersión de probetas de mortero arena-PL en agua (Fuente propia).



Figura 35. Pesado de cubo de mortero arena-PL después de la absorción (Fuente propia).

3.4.2.4 Prueba de compresión simple a probetas de mortero.

En esta prueba, se ensayaron las probetas a los 3, 7, 14 y 28 días de edad. Los especímenes se colocaron sobre un plato de acero y a su vez en cada ensaye se colocó sobre la cara superior del espécimen una rótula para absorber las deformidades que se pudiesen haber presentado. Posteriormente se comenzó con la aplicación de carga. Todo el procedimiento se ejecutó bajo los parámetros de la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002. Para obtener la resistencia a compresión de las probetas se utiliza la ecuación 5 mostrada en el apartado 3.4.1.3; que es dividir la carga soportada por el espécimen entre su área transversal.



Figura 36. Prueba de compresión simple a cubo de mortero arena-PL (Fuente propia).



Figura 37. Prueba de compresión simple a cubo de mortero arena-cemento (Fuente propia).

3.4.3 Elaboración de probetas de concreto.

En esta tercera y última etapa se elaboraron 60 probetas de concreto a base de grava, arena, cemento portland y PL variando los porcentajes de estos dos últimos. Los ensayos que se llevaron a cabo en estas probetas fueron de peso volumétrico en estado fresco, densidad, revenimiento, absorción en 24 horas, resistencia a la compresión simple y flexión pura. El diseño de mezcla de concreto se realizó de acuerdo con lo establecido por el reglamento ACI 211.1-97. Las proporciones de materiales se muestran en el capítulo siguiente. Se siguió la siguiente metodología:

1. Se procedió a cribar la arena por la malla #4 con el objetivo de retirar las gravas del material. Dado que se elaboraron probetas cilíndricas de 5x10 cm la grava se cribó por la malla 3/8" con el fin de obtener una mezcla con agregados de menor tamaño y que se distribuyeran estos de manera adecuada al momento de realizar el vaciado en los moldes.
2. Posteriormente se pesó la cantidad requerida de cemento portland, arena y grava.
3. Se midió la cantidad de agua a agregar con la ayuda de una probeta de plástico de 1000 ml.
4. Se engrasaron 12 moldes metálicos cilíndricos de 5x10 cm para después colar los especímenes. En el caso de las mezclas a base de PL, además de engrasar los moldes se recubrió la superficie interior con una capa de papel para evitar en mayor medida la adherencia entre el acero y el PL. Para cada mezcla distinta se colaron también 6 vigas para ensayos a flexión, sus dimensiones fueron de 4x4x16 cm según lo establecido con la norma ISO 679:2009.
5. Luego de la preparación de los moldes se procedió a realizar la mezcla.

6. Después de la preparación de la mezcla se realizó la prueba volumen en estado fresco y revenimiento.
7. Por último, se procedió a colar los 12 especímenes en los moldes y las 6 vigas, esto se hace en 3 capas, varillando cada capa con 25 golpes distribuidos en la superficie superior teniendo el cuidado de que no se traspase la capa por completo. Por último, se enrasa. Los especímenes se desmoldaron a las 24 horas.
8. Después de 24 horas se desmoldaron los cilindros de concreto y se midió su diámetro y altura, en el caso de las vigas se midió su sección transversal y su longitud, posteriormente se pesó cada uno de ellos y se sometieron a curado y saturación por inmersión total en agua en el cuarto húmedo del laboratorio, donde permanecieron hasta momentos antes de su preparación para el ensaye correspondiente.



Figura 38. Pesado de grava (Fuente propia).



Figura 39. Mezcla de concreto simple (Fuente propia).



Figura 40. Cilindros y vigas de concreto simple recién colados (Fuente propia).



Figura 41. Cilindros y vigas de concreto a base de PL recién colados (Fuente propia).

3.4.3.1 Prueba de peso volumétrico en estado fresco.

Para esta prueba se llenó una cubeta volumétrica de metal de 2.87 litros de capacidad, con tres capas de concreto. Se le aplican a cada capa 25 golpes con la varilla punta de bala de 5/8" de diámetro y se golpeó ligeramente la parte exterior de la cubeta; procurando no golpear en exceso para evitar que se disgregue la mezcla. Se enrasó la última capa con una regla de acero, se limpió la superficie exterior y por último se tomó el peso. Se realiza el mismo procedimiento 3 veces para obtener un promedio.

El peso volumétrico se obtiene mediante la ecuación

$$\gamma_F = \frac{W_m}{V_c} \quad \text{Ec. (8)}$$

En donde:

W_m = Peso de la muestra de concreto, (kg).

V_c = Volúmen de la cubeta, (m^3).



Figura 42. Varillado de concreto
(Fuente propia).



Figura 43. Peso de cubeta con
concreto (Fuente propia).

3.4.3.2 Prueba de densidad a probetas de concreto.

Esta prueba se realizó de igual manera que para las probetas de mortero en el laboratorio mediante el uso de un vernier analógico para medir la sección transversal, en este caso el diámetro, y la altura de cada uno de los especímenes de concreto, posteriormente se pesaron y finalmente la densidad se calculó mediante la ecuación 4 mostrada en la sección 3.4.1.1; esto es dividir el peso de la probeta entre el volumen obtenido.



Figura 44. Medición de cilindro de concreto (Fuente propia).



Figura 45. Pesado de cilindro de concreto (Fuente propia).

3.4.3.3 Prueba de revenimiento a mezclas de concreto.

Se realizaron las pruebas de revenimiento a cada diferente tipo de mezcla. La herramienta que se uso fue una varilla punta de bala de 1/4" de diámetro, una charola metálica, un tronco-cono de 15 cm de altura y 5 cm de diámetro superior y en su base inferior diámetro de 10 cm, se describe el procedimiento a

continuación:

Se humedece el molde y se coloca sobre una placa metálica. Posteriormente se llena el molde en 3 capas de aproximadamente igual volumen. Se compacta cada capa con 25 penetraciones de la varilla punta de bala de, de manera que la varilla pase por toda la sección de la capa.

Se compacta la segunda capa y la superior a través de todo su espesor de manera que la varilla penetre en la capa anterior aproximadamente 2 cm, para el llenado de la última capa se coloca un ligero excedente de concreto por la parte superior del molde antes de comenzar la compactación. Se enrasa la parte superior del cono. Al levantar el tronco-cono se debe hacer verticalmente sin movimiento lateral o torsional. Se mide inmediatamente el revenimiento, determinando el asentamiento del concreto a partir del nivel original de la base superior del molde, midiendo esta diferencia superior del espécimen.



Figura 46. Llenado de cono de revenimiento (Fuente propia).



Figura 47. Medición del revenimiento a mezcla de concreto base PL (Fuente propia).

3.4.3.4 Prueba de absorción en 24 horas a probetas de concreto.

La prueba de absorción consiste en determinar la cantidad de agua absorbida por el espécimen en 24 horas. Según la norma ASTM C 67 - 03 se pesa el espécimen, posteriormente se somete a inmersión total en agua a fría donde permanece durante 24 horas, después se extrae del agua y se seca su superficie; por último, se pesa nuevamente la probeta. La absorción se calcula de igual manera con la ecuación 5 mostrada en el apartado 3.4.1.2.



Figura 48. Inmersión de probetas de concreto grava-PL en agua (Fuente propia).



Figura 49. Pesado de cilindro de concreto grava-PL después de la absorción (Fuente propia).

3.4.3.5 Prueba de compresión simple a probetas de concreto.

Antes de realizar esta prueba es necesario llevar a cabo lo que se conoce como cabeceo de los cilindros, esto consiste en aplicar una superficie lisa y libre de imperfecciones a los cilindros en ambas caras, se lleva a cabo con un mortero base azufre con una resistencia de 527 kg/cm² aproximadamente. Este proceso se realiza calentando el azufre hasta su punto de fusión, una vez en estado líquido se vacía el azufre en el plato de acero y se coloca el cilindro de manera perpendicular al respaldo de tal manera que entre el eje longitudinal del cilindro y el mortero aplicado exista un ángulo de 90°, posteriormente se realiza el mismo procedimiento en la cara opuesta del cilindro.

Este proceso es necesario y se lleva a cabo para que los esfuerzos se distribuyan de manera uniforme en ambas caras de los cilindros.



Figura 50. Cilindros cabeceados, concreto simple. (Fuente propia).

En esta prueba, se ensayaron las probetas a los 3, 7, 14 y 28 días de edad. Los especímenes se colocaron sobre un plato de acero y a su vez en cada ensaye se colocó sobre la cara superior del espécimen una rótula para absorber las deformidades que se pudiesen haber presentado. Posteriormente se comenzó con la aplicación de carga. Todo el procedimiento se ejecutó bajo los parámetros de la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002. Para obtener la resistencia a compresión de las probetas se utiliza la ecuación 5 mostrada en el apartado

3.4.1.3; que es dividir la carga soportada por el espécimen entre su área transversal.



Figura 51. Prueba de compresión simple a cilindro de concreto base cemento portland (Fuente propia).



Figura 52. Prueba de compresión simple a cilindro de concreto base PL (Fuente propia).

3.4.3.6 Prueba de flexión pura a probetas de concreto.

Se realizó la prueba de flexión a cada diferente tipo de mezcla siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM C-78- 02, la cual indica que a una viga se le aplicará carga como se muestra en la figura 54. Únicamente se realizarán pruebas a vigas de 28 días después de su colado. La resistencia a flexión se calculará con las ecuaciones 9 y 10. Si la fractura inicia en la superficie en tensión y en el tercio medio de la separación entre apoyos se utilizará la ecuación 9.

$$R = PL/bd^2 \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

R = módulo de ruptura, (psi o MPa).

P = máxima carga aplicada indicada por la máquina universal, (lbf o N).

L = separación entre apoyos, (in o mm).

b = ancho promedio del espécimen, (in o mm), en la fractura, y

d = peralte promedio del espécimen, (in o mm), en la fractura

Si la fractura ocurre en la superficie en tensión y fuera del tercio medio de la separación entre apoyos y no más del 5% de la distancia entre apoyos, se utilizará la ecuación 10.

$$R = 3Pa/bd^2 \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

a = distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano medido en la superficie en tensión de la viga (in o mm).

Si la fractura ocurre en la superficie en tensión fuera del tercio medio de la distancia entre apoyos por más del 5% de la distancia entre apoyos, se descartan los resultados de la prueba.

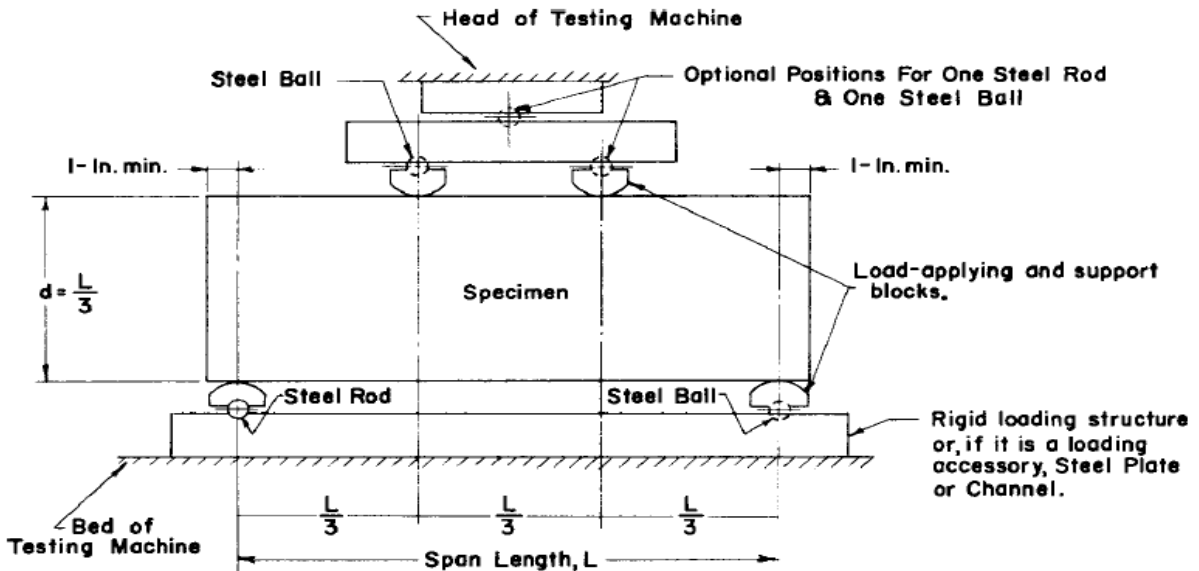


Figura 53. Esquema de prueba de flexión pura (de ASTM C-78-02).

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de probetas de PL.

Esta primera parte muestra los resultados de las probetas de PL, a las cuales se les realizaron los ensayos descritos en el capítulo anterior, para estas probetas se tuvo un tiempo de secado de 14 días. Teniendo en cuenta que únicamente se usaron para conocer la resistencia del PL en estado endurecido. Los parámetros obtenidos se compararon con los descritos en la sección 2.4.5 de este documento.

4.1.1 Resultados de prueba de densidad.

Tabla 10. Resultados de densidad de probetas de PL endurecido.

# probeta	Lado A (cm)	Lado B (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Densidad (kg/m ³)
1	1.422	1.398	2.594	5.16	3.1	0.601	601.15
2	1.402	1.414	2.455	4.87	2.74	0.563	562.99
3	1.396	1.422	2.419	4.80	3.05	0.635	635.15
4	1.532	1.472	2.222	5.01	2.48	0.495	494.93
5	1.396	1.475	2.705	5.57	3.71	0.666	666.08
6	1.346	1.376	2.601	4.82	3.22	0.668	668.42
Prom =						0.605	604.79

Se puede observar, y como era esperado, que la densidad del PL endurecido es más elevada que la del EPS. Esto es, la densidad incrementa de un promedio de 10 kg/cm³ a 604.79 kg/cm³ e incluso es superior a la densidad de los RMPE, siendo esta última de 217 kg/cm³, por este motivo se espera una resistencia a compresión mayor ya que el PL endurecido es un material más compacto.

4.1.2 Resultados de prueba de absorción en 24 horas.

Tabla 11. Resultados de absorción en probetas de PL endurecido.

# probeta	Peso (g)	Peso sat 24 hrs (g)	Absorción (%)
1	3.1	3.30	6.45
2	2.74	2.90	5.84
3	3.05	3.25	6.56
4	2.48	2.69	8.47
5	3.71	3.83	3.23
6	3.22	3.35	4.04
Prom =			5.76

El resultado promedio de absorción es mayor que la absorción promedio del EPS, esto es 5.76% de absorción para las probetas de PL endurecido contra un 3% promedio de la absorción del² EPS normalmente.

4.1.3 Resultados de prueba de compresión simple a edad de 20 días.

Tabla 12. Resultados de compresión simple en probetas de PL endurecido.

# probeta	Lado A (cm)	Lado B (cm)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	1.422	1.398	224.33	112.85
2	1.402	1.414	214.14	108.02
3	1.396	1.422	234.53	118.14
4	1.532	1.472	224.33	99.48
5	1.396	1.475	193.74	94.09
6	1.346	1.376	183.55	99.10
Prom =				105.28

Las probetas ensayadas se llevaron a soportar carga de falla, los resultados muestran que se obtuvo un promedio de 105.28 kg/cm²; esto es mayor a la resistencia promedio de 84.53 kg/cm² de los RMPE mencionados en la sección 2.4.5 (Kan & Demirboğa, 2009a).

4.2 Resultados de probetas de mortero.

En la segunda parte de la experimentación se trabajó con 5 mezclas de mortero a las cuales se les realizaron las pruebas descritas en el apartado 3.4.2 de este documento. Se realizaron una mezcla común de mortero cemento portland – arena, una mezcla mixta de cemento portland – PL – arena y tres mezclas de arena – PL; estas últimas tres variando la concentración de EPS diluido en la mezcla de solventes. Las dosificaciones y los resultados se muestran a continuación.

4.2.1 Resultados de prueba de fluidez.

La prueba de fluidez se le realiza al mortero para determinar de manera indirecta el contenido mínimo de agua que requiere la mezcla para sea lo suficientemente fluida para su uso, la fluidez de la mezcla es distinta para cada uso. La fluidez del mortero para pegar piezas se acepta de 105% a 130% y la fluidez del mortero de relleno se acepta de 125% a 130%, ambos con $\pm 5\%$ de variación y para el mortero que se realiza en obra se acepta el revenimiento, esto según la norma NMX-C-486-ONNCCE-2014.

Tabla 13. Dosificaciones usadas en cada tipo de mezcla de mortero (kg).

Material	Mezcla (kg)				
	Cemento - Arena	Cemento - PL 20% - Arena	PL 15% - Arena	PL 20% - Arena	PL 25% - Arena
Arena	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Cemento	1.5	1.125	0	0	0
Agua	1.5	1.125	0	0	0
PL	0	0.375	1	1	1

Es importante mencionar que la segunda columna de la tabla corresponde a la mezcla que se le añadió PL con una concentración del 20% en un 25% del total de material cementante. Y las mezclas que únicamente se agregó PL como material cementante este se usó con 15%, 20% y 25% de concentración.

Tabla 14. Fluidéz obtenida por tipo de mezcla.

Mezcla	# prueba	Diámetro obtenido (cm)	Diámetro inicial (cm)	Fluidéz (%)
Cemento - arena	1	21.67	10.16	113.29
	2	22.13	10.16	117.81
	3	21.41	10.16	110.73
Cemento - PL - arena	1	20.4	10.16	100.79
	2	19.71	10.16	94.00
	3	20.84	10.16	105.12
PL (15%) - Arena	1	19.75	10.16	94.39
	2	19.22	10.16	89.17
	3	18.51	10.16	82.19
PL (20%) - Arena	1	17.78	10.16	75.00
	2	18.65	10.16	83.56
	3	18.89	10.16	85.93
PL (25%) - Arena	1	14.5	10.16	42.72
	2	15	10.16	47.64
	3	14	10.16	37.80

Cabe mencionar que en el caso de las mezclas que únicamente contienen PL como cementante durante la prueba de fluidéz el material se disgregó en grumos como se observa en la figura siguiente.



Figura 54. Prueba de fluidéz en mezclas base PL (Fuente propia).

4.2.2 Resultados prueba de densidad a probetas de mortero.

La densidad de un mortero está directamente relacionada con la de los materiales que lo componen, así como con su contenido en aire. Los morteros ligeros son más trabajables a largo plazo. Se clasifican como morteros ligeros aquellos cuya densidad es igual o menor que 1300 kg/m^3 .

Las densidades de las mezclas de mortero se muestran a continuación en la tabla.

Tabla 15. Densidades de las distintas mezclas de mortero.

# Probeta	Densidad de probeta (kg/m^3)				
	Cemento - Arena	Cemento - PL (20% 25%) - Arena	PL (15%) - Arena	PL (20%) - Arena	PL (25%) - Arena
1	1693.75	1338.55	1148.91	1062.32	1114.14
2	1675.43	1487.31	1207.68	1051.47	1154.85
3	1675.73	1394.72	1176.01	1147.81	1154.02
4	1686.31	1516.72	1197.70	1073.94	1131.38
5	1711.93	1425.82	1154.80	1068.69	1115.98
6	1677.10	1513.66	1169.56	1082.24	1157.58
7	1647.99	1558.99	1104.78	1144.49	1161.04
8	1677.91	1509.00	1156.66	1121.51	1049.99
9	1693.71	1568.95	1112.83	1107.58	1033.02
10	1725.42	1428.54	1056.54	1068.69	949.90
11	1645.94	1486.18	1138.34	1082.24	1080.41
12	1678.89	1553.01	1271.77	1144.49	1100.40
Prom =	1682.51	1481.79	1157.97	1096.29	1100.23

Puede observarse en la tabla que se obtienen mezclas más ligeras agregando PL como cementante, esto con comparando dichas mezclas con las convencionales base cemento hidráulico, para este estudio la disminución en el peso de la mezcla con 100% de PL como cementante fue del orden de un 35%.

4.2.3 Resultados prueba de absorción en 24 horas a probetas de mortero.

La absorción en cada mezcla se determinó mediante la ecuación 5. En si la absorción afecta a los morteros que quedan expuestos directamente al agua. Su importancia radica en que la absorción determina la permeabilidad del mortero. Si el mortero es permeable al agua, transmitirá ésta hacia el interior originando la consiguiente aparición de humedades por filtración. La absorción depende de la estructura capilar del material, por tanto, cuanto más compacto sea un mortero, menor será la red capilar y, en consecuencia, menor absorción presentará.

Tabla 16. Absorción de las distintas mezclas de mortero.

# Probeta	Absorción de probeta (%)				
	Cemento - Arena	Cemento - PL (20% 25%) - Arena	PL (15%) - Arena	PL (20%) - Arena	PL (25%) - Arena
1	4.51	11.16	14.52	23.95	24.00
2	3.94	13.14	13.96	22.86	19.50
3	5.14	10.54	15.50	16.87	28.45
4	6.01	14.97	14.37	20.93	23.49
5	4.83	12.87	17.14	20.10	26.10
6	5.98	12.94	16.91	20.78	28.84
7	6.11	11.61	15.73	17.24	22.25
8	5.60	13.57	16.61	17.76	18.31
9	4.77	14.64	17.96	20.03	31.96
10	3.58	14.49	18.22	20.10	37.17
11	6.55	13.78	17.97	20.78	26.24
12	6.31	10.98	12.14	17.24	19.10
Prom =	5.28	12.89	15.92	19.89	25.45

De los resultados en la tabla 16 se puede apreciar que a medida que se va sustituyendo el cemento Portland en la pasta de mortero se obtiene mayor absorción, lo que nos indica que la mezcla aumenta su porosidad con la sustitución de cemento hidráulico por PL.

4.2.4 Resultados prueba de compresión simple a probetas de mortero.

4.2.4.1 Resultados de compresión simple en mezcla de mortero cemento – arena.

Tabla 17. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla cemento – arena.

Edad (días)	# Probeta	Área (cm ²)	Carga Máquina (kN)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo Promedio (kg/cm ²)
3	1	25.065	10.85	1106.37	44.14	41.81
	2	25.329	9.42	960.56	37.92	
	3	25.867	11.00	1121.67	43.36	
7	4	25.200	15.00	1529.55	60.70	60.43
	5	25.075	15.41	1571.36	62.67	
	6	25.522	14.50	1478.57	57.93	
14	7	26.074	17.60	1794.67	68.83	68.64
	8	25.543	16.80	1713.10	67.07	
	9	25.639	17.60	1794.67	70.00	
28	10	25.055	21.50	2192.36	87.50	88.41
	11	25.781	22.49	2293.31	88.95	
	12	25.286	22.00	2243.34	88.72	

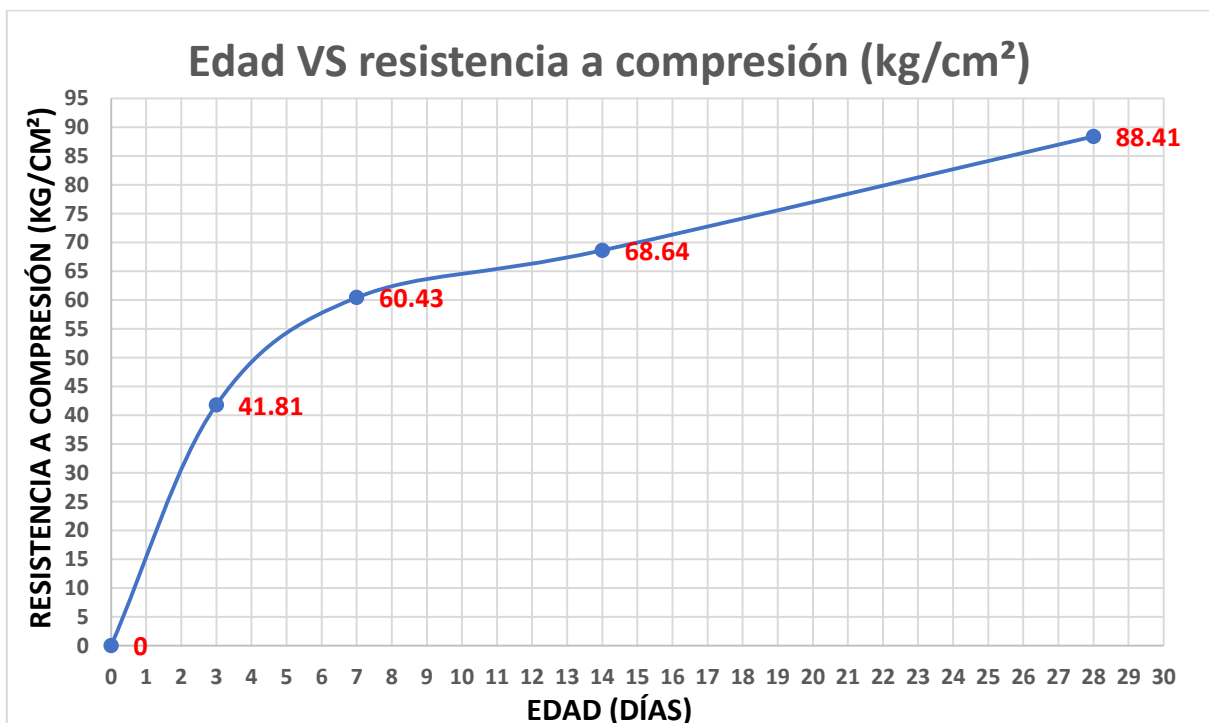


Figura 55. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla cemento – arena.

4.2.4.2 Resultados de compresión simple en mezcla de mortero cemento – PL (20% 25%) – arena.

Tabla 18. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla cemento – PL (20% 25%) – arena.

Edad (días)	# Probeta	Área (cm ²)	Carga Máquina (kN)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo Promedio (kg/cm ²)
3	1	25.800	6.50	662.81	25.69	27.40
	2	25.825	6.71	684.22	26.49	
	3	25.608	7.54	768.85	30.02	
7	4	26.394	9.42	960.56	36.39	37.84
	5	26.326	10.64	1084.96	41.21	
	6	25.984	9.15	933.03	35.91	
14	7	25.989	10.56	1076.80	41.43	43.15
	8	27.855	11.41	1163.48	41.77	
	9	26.466	12.00	1223.64	46.23	
28	10	26.117	15.20	1549.94	59.35	58.12
	11	26.219	14.10	1437.78	54.84	
	12	26.265	15.50	1580.54	60.18	

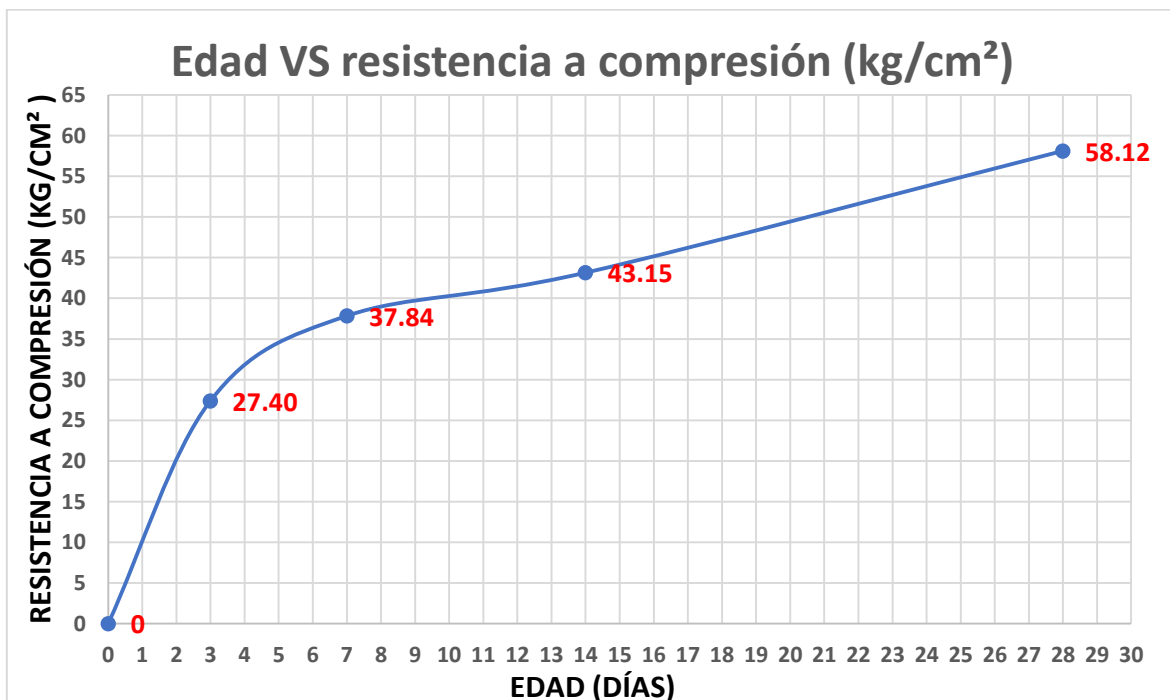


Figura 56. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla cemento – PL (20% 25%) – arena.

4.2.4.3 Resultados de compresión simple en mezcla de mortero cemento – PL (15%) – arena.

Tabla 19. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla PL (15%) – arena.

Edad (días)	# Probeta	Área (cm ²)	Carga Máquina (kN)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo Promedio (kg/cm ²)
3	1	24.741	7.14	728.07	29.4279	32.18
	2	25.150	8.04	819.84	32.5978	
	3	24.985	8.46	862.67	34.5278	
7	4	26.240	9.36	954.44	36.3735	38.16
	5	25.536	10.05	1024.80	40.131	
	6	26.312	9.80	999.31	37.9794	
14	7	26.097	11.68	1191.01	45.6383	43.07
	8	25.316	10.89	1110.45	43.8638	
	9	25.366	9.88	1007.46	39.717	
28	10	25.416	10.98	1119.63	44.0517	43.26
	11	25.978	11.04	1125.75	43.3346	
	12	25.441	10.58	1078.84	42.4051	

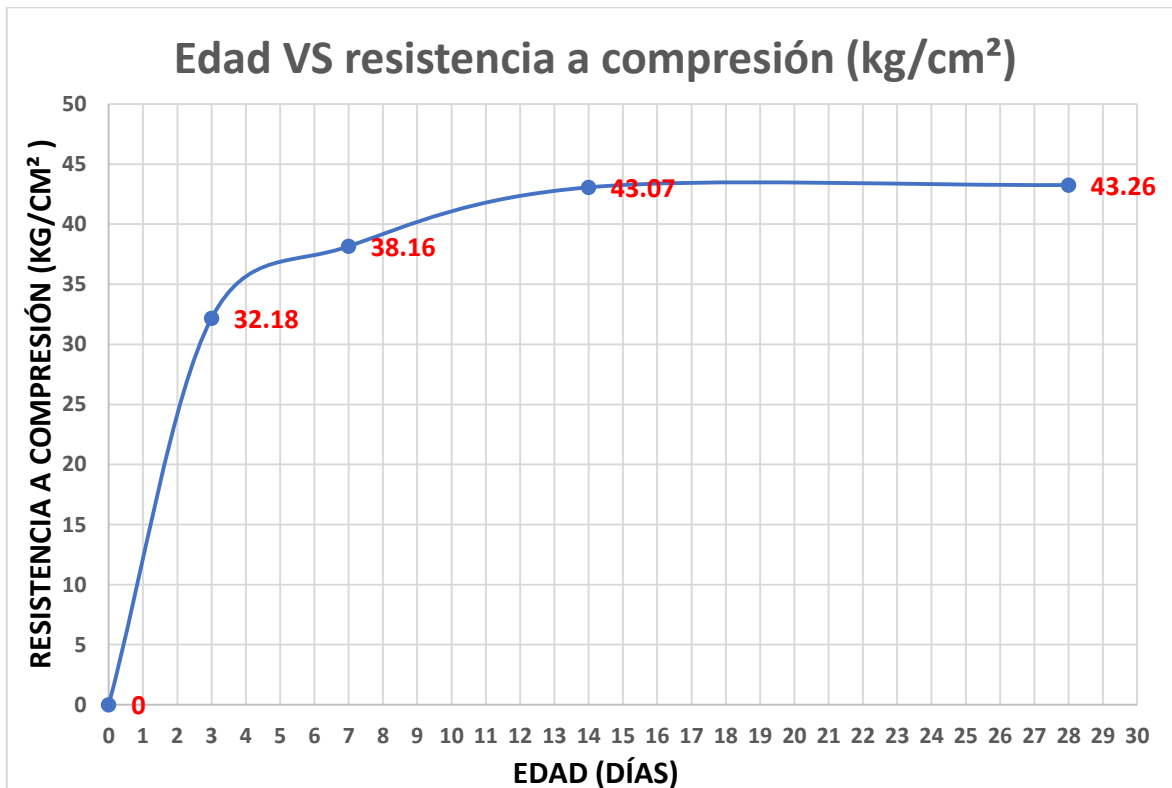


Figura 57. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla PL (15%) – arena.

4.2.4.4 Resultados de compresión simple en mezcla de mortero cemento – PL (20%) – arena.

Tabla 20. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla PL (20%) – arena.

Edad (días)	# Probeta	Área (cm ²)	Carga Máquina (kN)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo Promedio (kg/cm ²)
3	1	26.004	9.15	933.03	35.88	42.70
	2	25.477	10.88	1109.43	43.55	
	3	26.957	12.87	1312.35	48.68	
7	4	26.014	14.10	1437.78	55.27	52.71
	5	26.035	12.61	1285.84	49.39	
	6	25.923	13.59	1385.77	53.46	
14	7	25.447	13.37	1363.34	53.58	56.49
	8	26.080	14.15	1442.88	55.33	
	9	25.255	15.00	1529.55	60.56	
28	10	26.035	13.90	1417.38	54.44	56.25
	11	25.923	14.50	1478.57	57.04	
	12	25.447	14.29	1457.15	57.26	

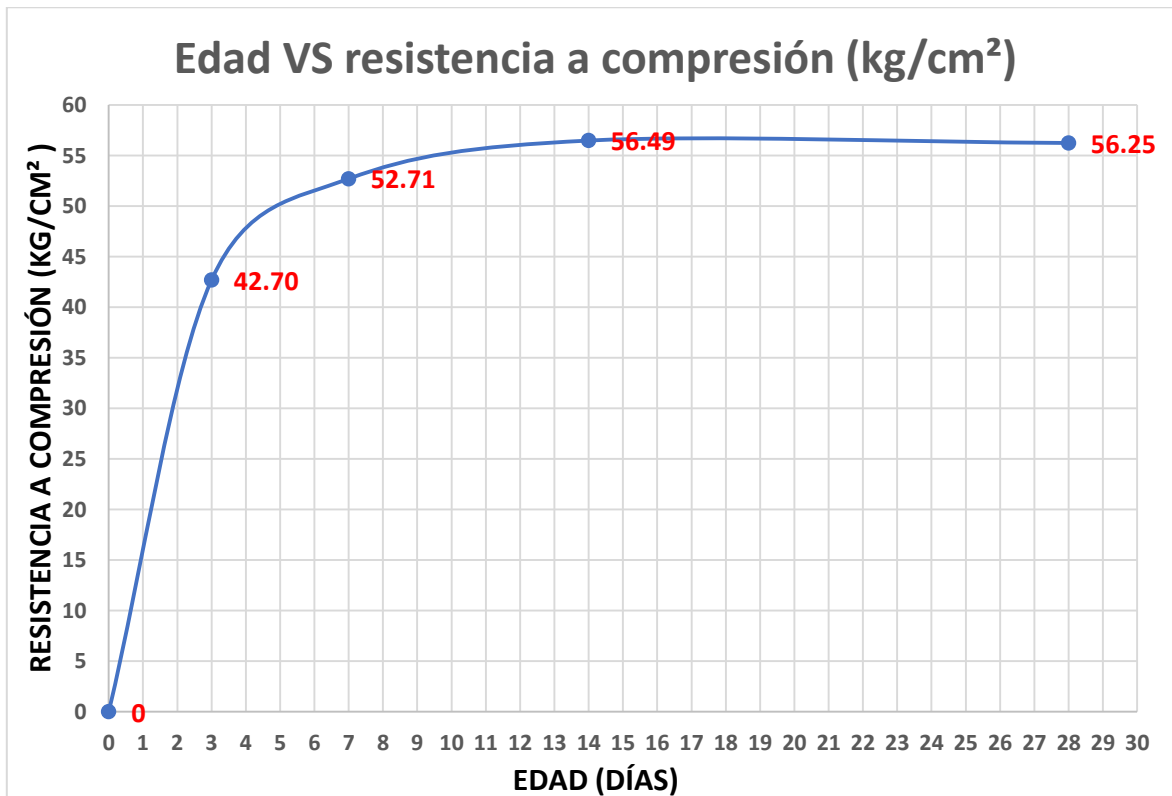


Figura 58. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla PL (20%) – arena.

4.2.4.5 Resultados de compresión simple en mezcla de mortero cemento – PL (25%) – arena.

Tabla 21. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla PL (25%) – arena.

Edad (días)	# Probeta	Área (cm ²)	Carga Máquina (kN)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo Promedio (kg/cm ²)
3	1	25.306	0.89	90.75	3.58625	3.46
	2	27.169	0.89	90.75	3.34029	
	3	26.192	0.89	90.75	3.46486	
7	4	27.866	6.35	647.51	23.2364	29.21
	5	27.541	8.93	910.59	33.0627	
	6	27.368	8.41	857.57	31.3352	
14	7	26.219	14.14	1441.86	54.9918	54.15
	8	27.766	15.52	1582.57	56.9976	
	9	26.702	13.21	1347.02	50.4459	
28	10	28.867	17.49	1783.46	61.7809	59.46
	11	28.805	15.84	1615.20	56.0744	
	12	28.521	16.93	1726.35	60.5293	

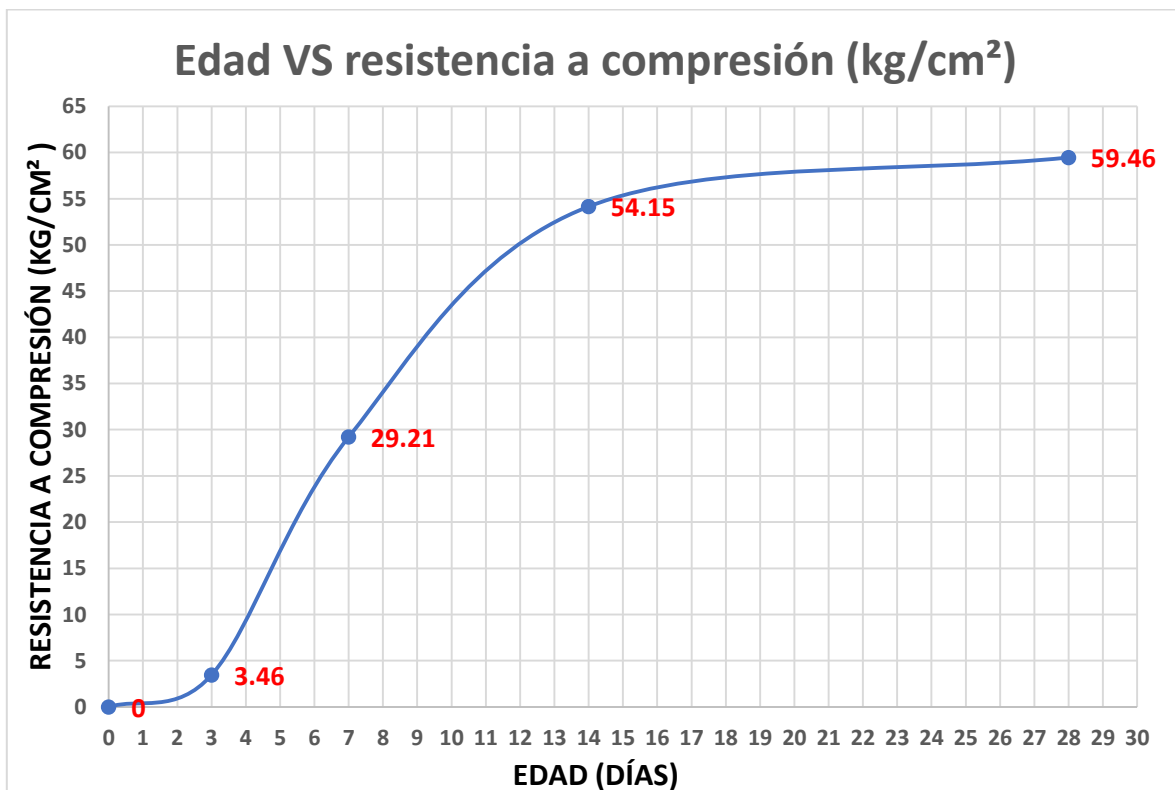


Figura 59. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla PL (25%) – arena.

4.2.4.6 Resultados de compresión simple en mezclas de mortero.

Tabla 22. Resistencias a compresión de las mezclas de mortero.

Edad (días)	Esfuerzo (kg/cm ²)				
	Cemento - Arena	Cemento - PL (20% 25%) - Arena	PL (15%) - Arena	PL (20%) - Arena	PL (25%) - Arena
0	0	0	0	0	0
3	41.81	27.40	32.18	42.70	3.46
7	60.43	37.84	38.16	52.71	29.21
14	68.64	43.15	43.07	56.49	54.15
28	88.41	58.12	43.26	56.25	59.46

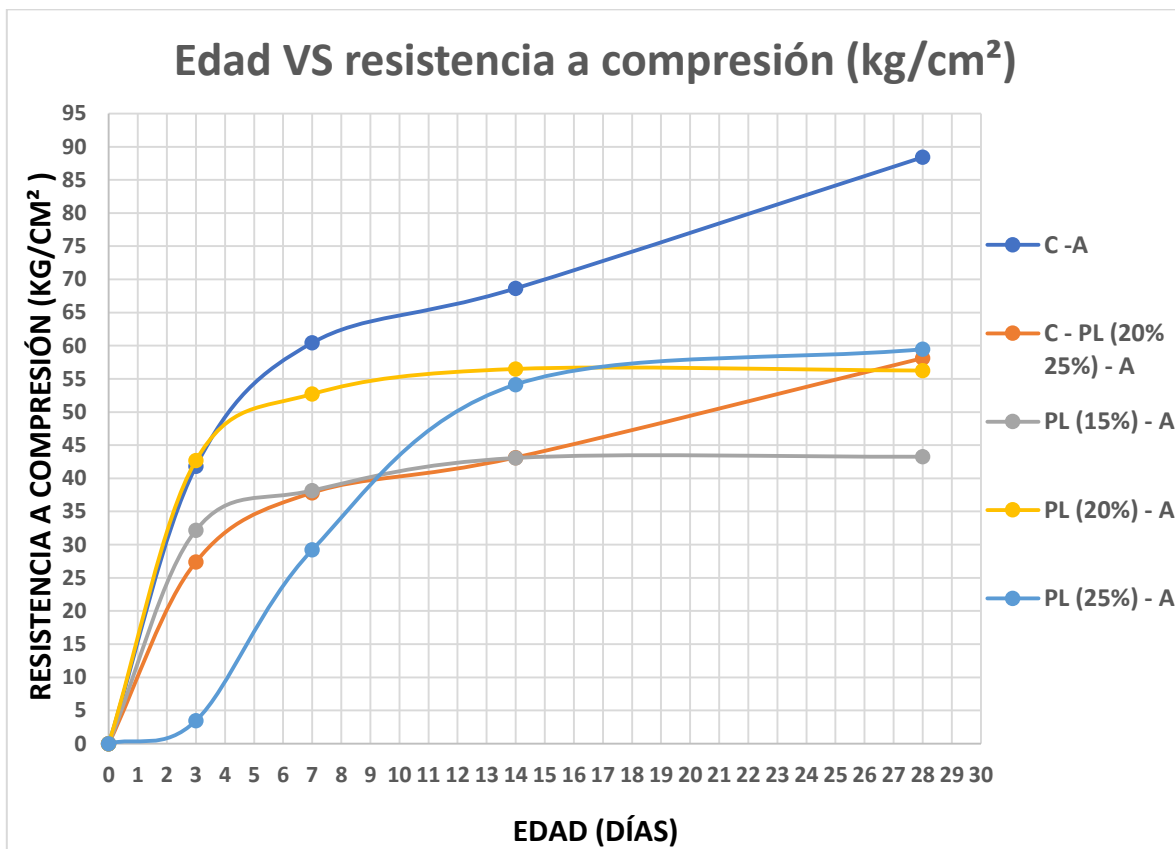


Figura 60. Gráfico de resistencia a compresión de mezclas.

Se puede apreciar en el gráfico de la figura 64 el comportamiento a las diferentes edades de las mezclas que se ensayaron en el laboratorio. En el gráfico podemos observar que las mezclas que contienen PL se comportan de manera similar e incluso alcanzan a obtener una resistencia similar en el orden

de 56 a 59 kg/cm², esto en las mezclas con 20% y 25% de concentración de EPS en la mezcla de solventes. Lo que se observó en la etapa experimental fue que la mezcla PL – arena que se realizó con 25% de EPS tuvo un tiempo de secado mayor que la mezcla PL – arena que se realizó con 20% de EPS y al finalizar las pruebas se pudo observar que la resistencia de ambas era similar, por este motivo se procedió a trabajar las mezclas de concreto con la concentración de 20% de EPS.

4.3 Resultados de probetas de concreto.

En la última parte de la experimentación se trabajó con mezclas de concreto a las cuales se les realizaron las pruebas descritas en el apartado 3.4.3 de este documento. Se realizaron cuatro mezclas distintas de concreto, una mezcla común de concreto cemento portland – grava – arena, una mezcla mixta de cemento portland – PL – grava – arena y dos mezclas de PL – grava; estas últimas dos variando la granulometría del material pétreo. Las dosificaciones y los resultados se muestran a continuación.

Tabla 23. Dosificaciones usadas en cada tipo de mezcla de concreto.

Material	Mezcla (kg)			
	Cemento - Grava - Arena	Cemento - PL 20% 25% - Grava - Arena	PL 20% - Grava 13 y 10 mm	PL 20% - Grava 10 mm a finos
Grava	5.024	5.024	5.024	5.024
Arena	3.82	3.82	2.5	2.5
Cemento	2.55	1.91	0	0
Agua	1.75	1.31	0	0
PL	0	1.075	0	0

De igual manera como en el caso de la mezcla de mortero la segunda columna de la tabla corresponde a que se añadió a la mezcla PL con una concentración del 20% en un 25% del total de material cementante. Y las mezclas que únicamente se agregó PL como material cementante este se usó con un 20% de concentración y se cambió el tamaño del material usado.

4.3.1 Resultados de prueba de peso volumétrico en estado fresco.

Esta prueba sirve para observar el cambio en el peso unitario de las mezclas cuando se les agrega PL y a medida que se reemplaza el cemento portland de la mezcla. Por desgracia no fue posible reemplazar el cemento hidráulico en intervalos del 25% como se había pensado al principio de esta investigación, ya que al reemplazar más del 25% las probetas no tenían resistencia ya que al desmoldarlas se disgregaban con el manejo de las manos ya que no había cohesión entre los materiales.

Tabla 24. Peso volumétrico en estado fresco de cada tipo de mezcla de concreto.

Mezcla	# prueba	Peso volumétrico en estado fresco (kg/m ³)	Promedio (kg/m ³)
Cemento - Grava - Arena	1	2663.42	2666.90
	2	2673.85	
	3	2663.42	
Cemento - PL 20% 25% - Grava - Arena	1	2541.72	2542.88
	2	2531.29	
	3	2555.63	
PL 20% - Grava 13 y 10 mm	1	1912.38	1941.35
	2	1964.53	
	3	1947.15	
PL 20% - Grava 10 mm a finos	1	1999.30	1993.51
	2	1981.92	
	3	1999.30	

Se puede observar de la tabla que en este estudio el peso volumétrico en estado fresco pudo reducirse significativamente hasta un 25% sustituyendo al 100% el cemento hidráulico de la mezcla por el PL

4.3.2 Resultados de prueba de densidad a probetas de concreto.

La densidad de un concreto se relaciona con la de los materiales que lo componen, así como con su contenido en aire y el tamaño de los agregados. Los concretos que se clasifican como ligeros son aquellos que su densidad es igual o

menor que 1800 kg/m³.

Las densidades de las mezclas de concreto se muestran a continuación en la tabla.

Tabla 25. Densidades de las distintas mezclas de concreto.

# Probeta	Densidad de probeta (kg/m ³)			
	Cemento - Grava - Arena	Cemento - PL 20% 25% - Grava - Arena	PL 20% - Grava 13 y 10 mm	PL 20% - Grava 10 mm a finos
1	2082.19	2082.19	1429.15	1711.83
2	2099.55	1978.06	1423.26	1620.79
3	2100.87	1929.20	1348.17	1616.38
4	2071.37	2002.13	1368.33	1732.31
5	2088.40	1952.37	1355.56	1666.15
6	2111.39	1853.43	1392.91	1681.47
7	2121.85	1902.91	1350.99	1622.77
8	2076.01	1783.92	1308.11	1571.99
9	2094.40	1911.60	1417.98	1760.78
10	2136.20	2024.48	1355.05	1673.46
11	2071.55	1911.87	1346.81	1706.75
12	2089.86	1929.70	1346.21	1602.74
Prom =	2095.30	1938.49	1370.21	1663.95

Puede observarse en la tabla que se obtienen mezclas más ligeras agregando PL como cementante, esto con relación a las mezclas convencionales base cemento hidráulico.

4.3.3 Resultados de prueba de revenimiento a mezclas de concreto.

El revenimiento es una propiedad de las mezclas de concreto la cual nos da una idea sobre la manejabilidad de estas al momento de su colocación. En la experimentación se utilizó un procedimiento no establecido en la norma, pero aun así nos podemos dar una idea de que tan fluida fueron las mezclas elaboradas en el laboratorio. Esta prueba se realizó con un cono de lámina de 15 cm de altura, 10 cm de diámetro inferior y 5 cm de diámetro superior; mientras que las medidas del cono establecidas en la norma son de 30 cm de altura, 20 cm de diámetro inferior y 10 cm de diámetro superior. Los resultados se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 26. Revenimiento de las distintas mezclas de concreto.

Mezcla	# de prueba	Revenimiento obtenido (cm)	Revenimiento de diseño (cm)	Tamaño máximo del agregado (mm)
Cemento - Grava - Arena	1	5.5	5	10
	2	4.5	5	10
	3	4.5	5	10
Cemento - PL 20% 25% - Grava - Arena	1	7.5	5	10
	2	7	5	10
	3	7.5	5	10
PL 20% - Grava 13 y 10 mm	1	8.5	5	10
	2	8	5	10
	3	9	5	10
PL 20% - Grava 10 mm a finos	1	8	5	10
	2	9	5	10
	3	8	5	10

4.3.4 Resultados de prueba de absorción en 24 horas a probetas de concreto.

Tabla 27. Absorción de las distintas mezclas de concreto.

# Probeta	Absorción de probeta (%)			
	Cemento - Grava - Arena	Cemento - PL 20% 25% - Grava - Arena	PL 20% - Grava 13 y 10 mm	PL 20% - Grava 10 mm a finos
1	0.89	2.25	7.77	3.72
2	1.16	2.00	5.38	3.69
3	0.94	2.16	8.32	2.93
4	1.09	2.26	7.16	3.01
5	0.98	2.06	5.91	1.88
6	1.19	3.00	7.32	6.57
7	1.07	2.25	6.64	3.84
8	1.13	2.46	5.73	4.29
9	0.97	2.90	5.60	2.84
10	1.11	2.66	8.62	4.65
11	1.46	2.79	5.17	3.98
12	1.14	2.17	5.40	4.70
Prom =	1.09	2.41	6.59	3.84

La absorción en cada mezcla se determinó mediante la ecuación 5 del apartado 3.4.1.2. Y como es en el caso de los morteros la absorción afecta a las mezclas que quedan expuestas directamente al agua.

4.3.5 Resultados de prueba de compresión simple a probetas de concreto.

4.3.5.1 Resultados de compresión simple de mezcla cemento – grava – arena.

Tabla 28. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla cemento - grava – arena.

Edad (días)	# Probeta	Área (cm ²)	Carga Máquina (kN)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo promedio (kg/cm ²)
3	1	19.400	21.50	2192.36	113.01	111.33
	2	20.030	23.18	2363.66	118.01	
	3	20.508	20.71	2111.80	102.97	
7	4	20.109	30.86	3146.79	156.49	153.90
	5	20.268	29.54	3012.19	148.62	
	6	19.950	30.64	3124.36	156.61	
14	7	20.348	35.68	3638.29	178.80	176.88
	8	20.508	34.79	3547.54	172.98	
	9	20.189	35.41	3610.76	178.85	
28	10	19.950	41.54	4235.83	212.32	214.38
	11	20.189	42.83	4367.38	216.33	
	12	20.508	43.14	4398.99	214.50	

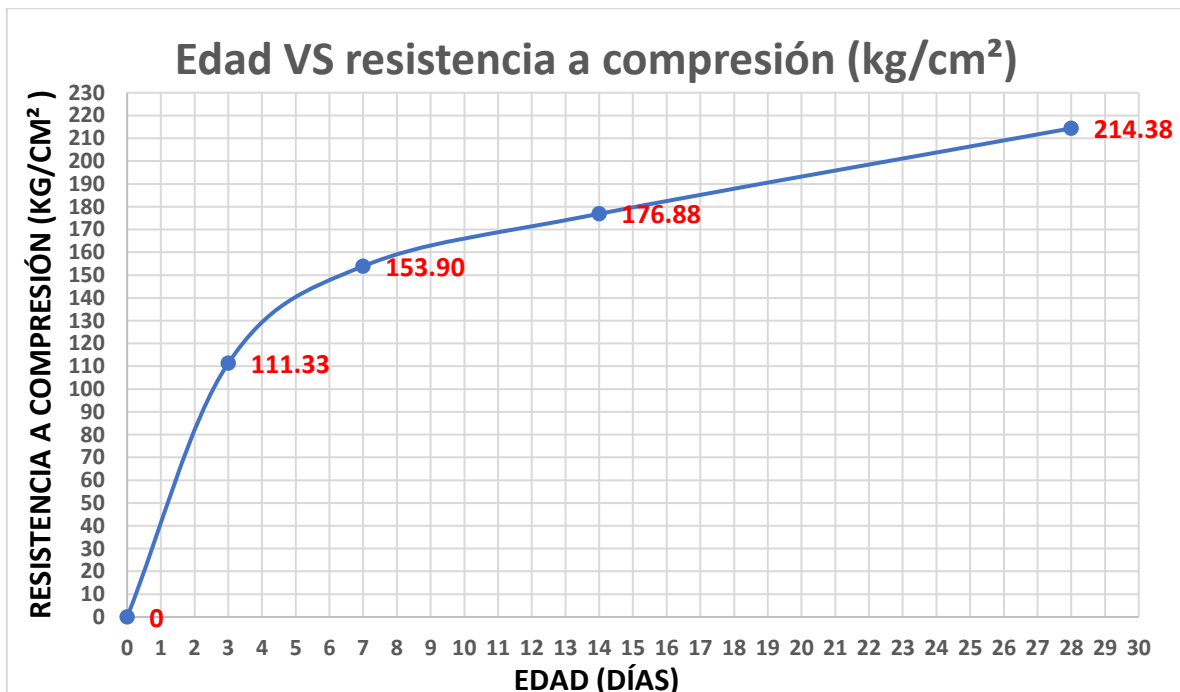


Figura 61. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla cemento - grava – arena.

**4.3.5.2 Resultados de compresión simple de mezcla cemento - PL 20%
25% - grava - arena.**

Tabla 29. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla cemento - PL 20%
25% - Grava - Arena.

Edad (días)	# Probeta	Área (cm ²)	Carga Máquina (kN)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo promedio (kg/cm ²)
3	1	19.400	13.94	1421.46	73.27	69.49
	2	20.030	13.91	1418.40	70.82	
	3	20.508	12.95	1320.51	64.39	
7	4	20.109	18.00	1835.46	91.28	96.50
	5	20.268	19.72	2010.85	99.21	
	6	19.950	19.37	1975.16	99.00	
14	7	20.348	23.52	2398.33	117.86	119.09
	8	20.508	23.67	2413.63	117.69	
	9	20.189	24.10	2457.48	121.73	
28	10	19.950	27.41	2795.00	140.10	133.78
	11	20.189	25.16	2565.57	127.08	
	12	20.508	26.98	2751.15	134.15	

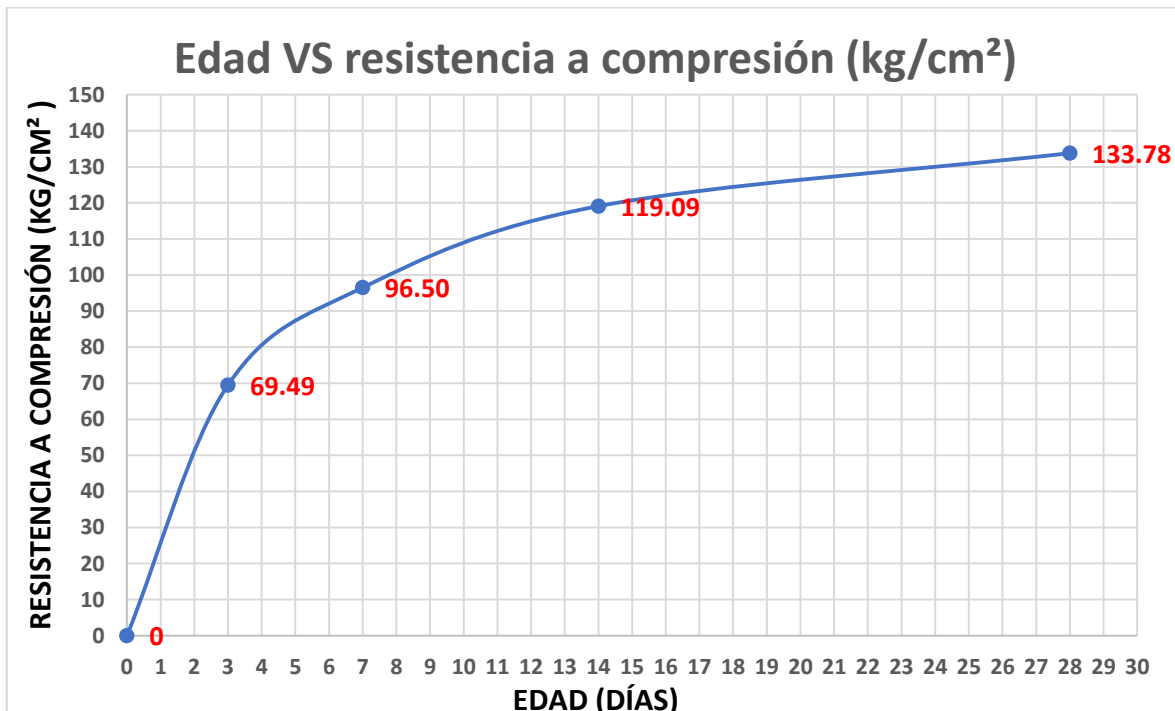


Figura 62. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla Cemento - PL 20% 25%
- Grava - Arena.

4.3.5.3 Resultados de compresión simple de mezcla PL 20% - grava 13 y 10 mm.

Tabla 30. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla PL 20% - grava 13 y 10 mm.

Edad (días)	# Probeta	Área (cm ²)	Carga Máquina (kN)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo promedio (kg/cm ²)
3	1	19.400	17.45	1779.38	91.72	87.20
	2	20.030	16.67	1699.84	84.87	
	3	20.508	17.10	1743.69	85.02	
7	4	20.109	21.10	2151.57	107.00	113.53
	5	20.268	23.40	2386.10	117.73	
	6	19.950	22.67	2311.66	115.87	
14	7	20.348	23.52	2398.33	117.86	109.92
	8	20.508	21.18	2159.72	105.31	
	9	20.189	21.10	2151.57	106.57	
28	10	19.950	22.67	2311.66	115.87	113.65
	11	20.189	23.40	2386.10	118.19	
	12	20.508	21.50	2192.36	106.90	

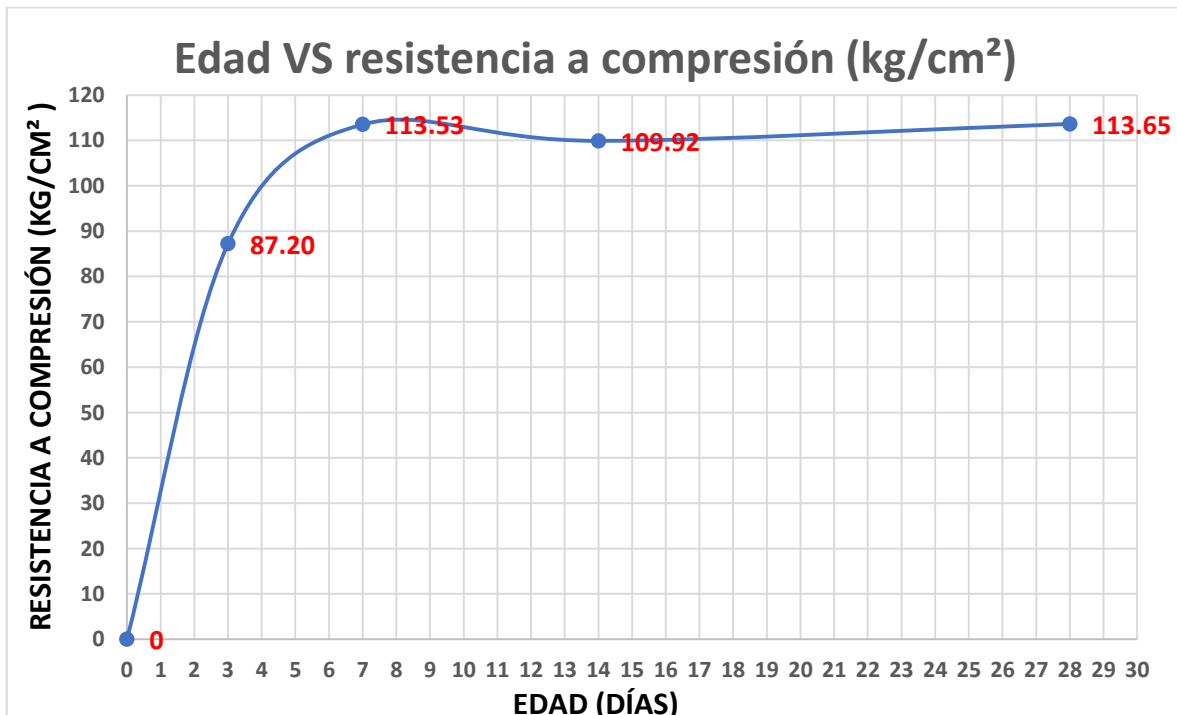


Figura 63. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla PL 20% - grava 13 y 10 mm.

4.3.5.4 Resultados de compresión simple de mezcla PL 20% - grava 10 mm a finos.

Tabla 31. Secciones y resistencias de las probetas de mezcla PL 20% - grava 10 mm a finos.

Edad (días)	# Probeta	Área (cm ²)	Carga Máquina (kN)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo promedio (kg/cm ²)
3	1	19.400	17.14	1747.77	90.09	91.60
	2	20.030	17.90	1825.26	91.13	
	3	20.508	18.82	1919.08	93.58	
7	4	20.109	19.82	2021.05	100.50	96.83
	5	20.268	17.63	1797.73	88.70	
	6	19.950	19.82	2021.05	101.30	
14	7	20.348	18.71	1907.86	93.76	108.06
	8	20.508	23.40	2386.10	116.35	
	9	19.400	21.70	2212.75	114.06	
28	10	19.950	22.50	2294.33	115.00	115.08
	11	20.189	22.45	2289.23	113.39	
	12	20.508	23.50	2396.30	116.84	

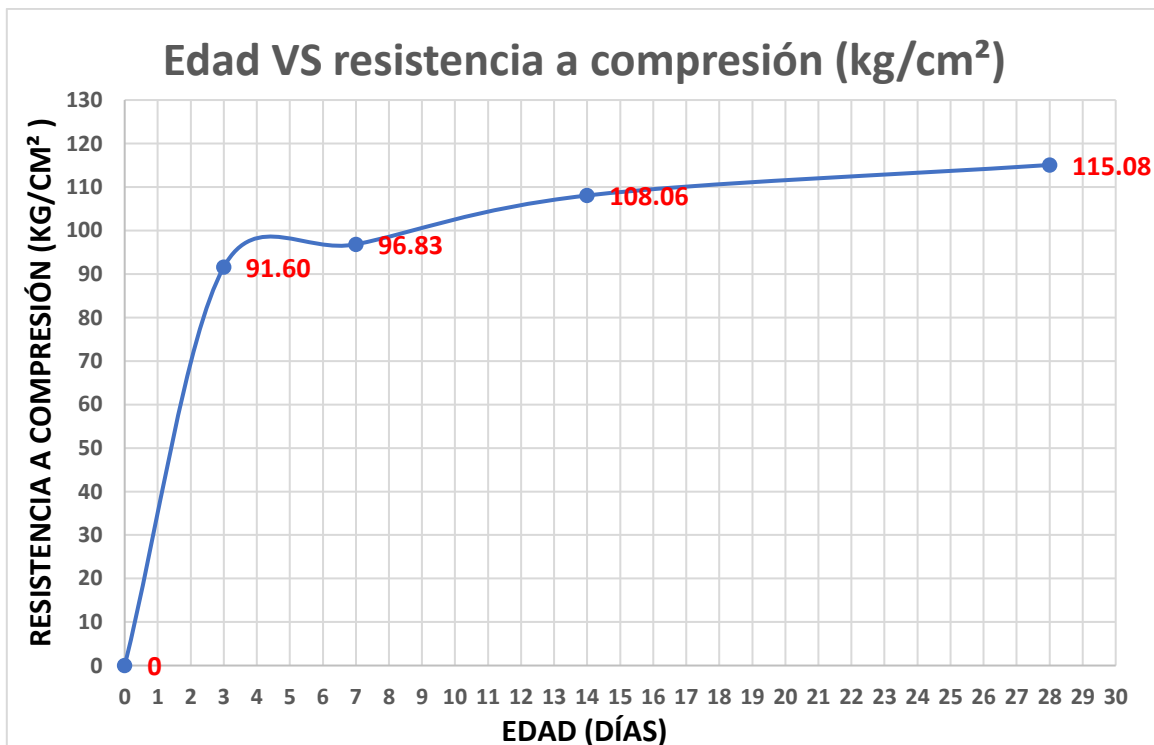


Figura 64. Gráfico de resistencia a compresión de mezcla PL 20% - grava 10 mm a finos.

4.3.5.5 Resultados de compresión simple en mezclas de concreto.

Tabla 32. Resistencias a compresión de las mezclas de concreto.

Edad (días)	Esfuerzo (kg/cm ²)			
	Cemento - Grava - Arena	Cemento - PL 20% 25% - Grava - Arena	PL 20% - Grava 13 y 10 mm	PL 20% - Grava 10 mm a finos
0	0	0	0	0
3	111.32	69.49	87.20	91.60
7	153.90	96.50	113.53	96.83
14	176.87	119.09	109.92	108.06
28	214.38	133.78	113.65	115.08

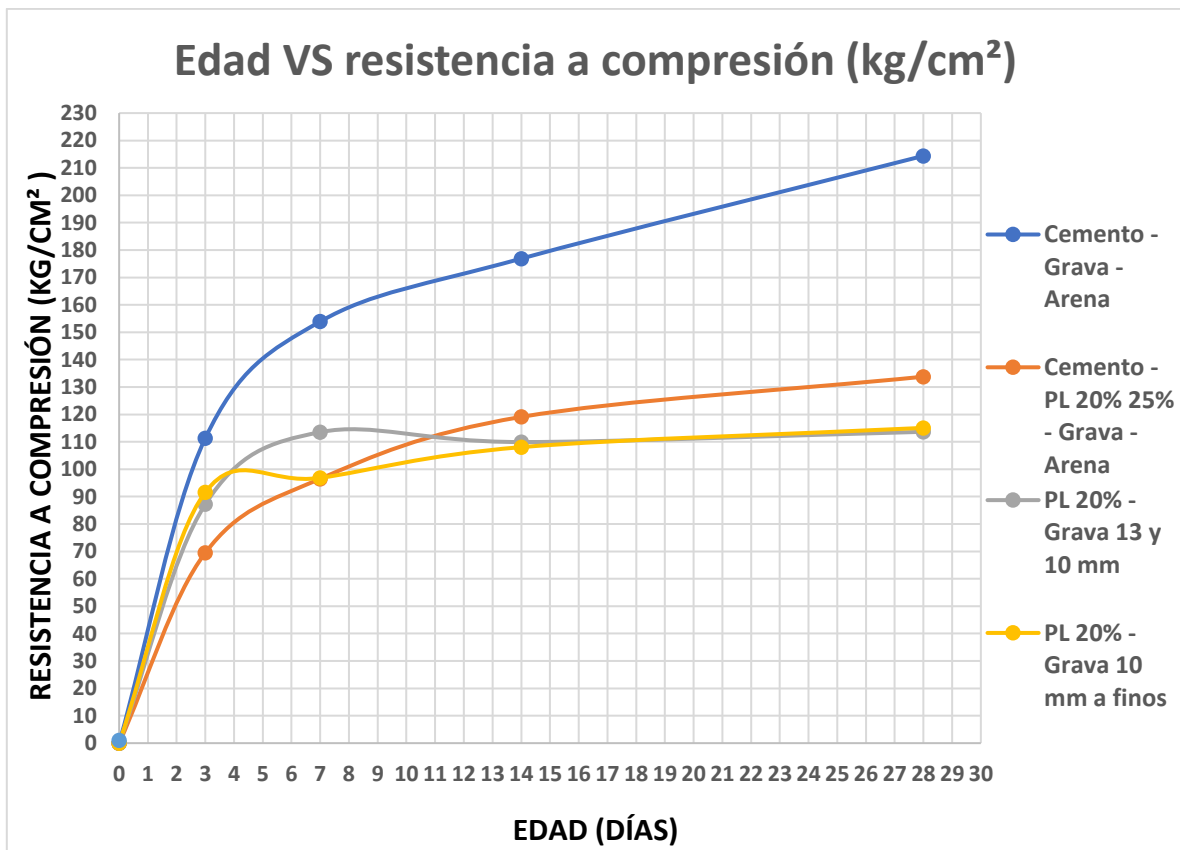


Figura 65. Gráfico de resistencia a compresión de mezclas.

Se puede apreciar en el gráfico de la figura 69 el comportamiento a las diferentes edades de las mezclas que se ensayaron en el laboratorio. En el gráfico podemos observar que las mezclas que contienen únicamente PL como

cementante (color gris y amarillo) se comportan de manera similar e incluso alcanzan a obtener una resistencia similar en el orden de 113 a 115 kg/cm², esto en las mezclas con agregado de 13 y 10 mm y de 10 mm a finos. Lo que se observó en la etapa experimental fue que al elaborar las probetas de tamaños 13 y 10 mm fue más difícil de mezclar la pasta, así como su acomodo en los moldes, mientras que la mezcla de 10 mm a finos tuvo la manejabilidad de un mortero, pero su estructura fue más densa.

4.3.6 Resultados de prueba de flexión pura a probetas de concreto.

Tabla 33. Resistencias a flexión pura de las mezclas de concreto.

Mezcla	# Probeta	Promedio secc. (cm ²)	Longitud (cm)	Carga Máquina (kN)	Carga (kg)	R (kg/cm ²)	R promedio (kg/cm ²)
Cemento Grava Arena	1	15.775	15.91	3.57	364.03	62.46	61.82
	2	16.104	16.160	3.68	375.25	63.58	
	3	16.092	16.200	3.15	321.21	52.85	
	4	15.820	15.800	3.81	388.51	65.94	
	5	15.939	16.100	3.73	380.35	63.70	
	6	15.746	16.200	3.61	368.11	62.38	
Cemento PL 20% 25% Grava Arena	1	15.775	15.91	2.47	251.87	43.21	44.86
	2	16.104	16.160	2.59	264.10	44.75	
	3	16.092	16.200	2.78	283.48	46.64	
	4	15.820	15.800	2.65	270.22	45.86	
	5	15.939	16.100	2.46	250.85	42.01	
	6	15.746	16.200	2.70	275.32	46.66	
PL 20% Grava 13 y 10 mm	1	15.775	15.91	1.50	152.96	26.24	27.10
	2	16.104	16.160	1.75	178.45	30.24	
	3	16.092	16.200	1.45	147.86	24.33	
	4	15.820	15.800	1.55	158.05	26.82	
	5	15.939	16.100	1.75	178.45	29.89	
	6	15.746	16.200	1.45	147.86	25.06	
PL 20% Grava 10 mm a finos	1	15.775	15.91	1.75	178.45	30.62	27.40
	2	16.104	16.160	1.55	158.05	26.78	
	3	16.092	16.200	1.50	152.96	25.17	
	4	15.820	15.800	1.65	168.25	28.55	
	5	15.939	16.100	1.50	152.96	25.62	
	6	15.746	16.200	1.60	163.15	27.65	

Para calcular el módulo de ruptura R se hizo uso de la ecuación no. 9, ya que en los ensayos la fractura de las probetas ocurrió en el tercio medio de la distancia entre apoyos.

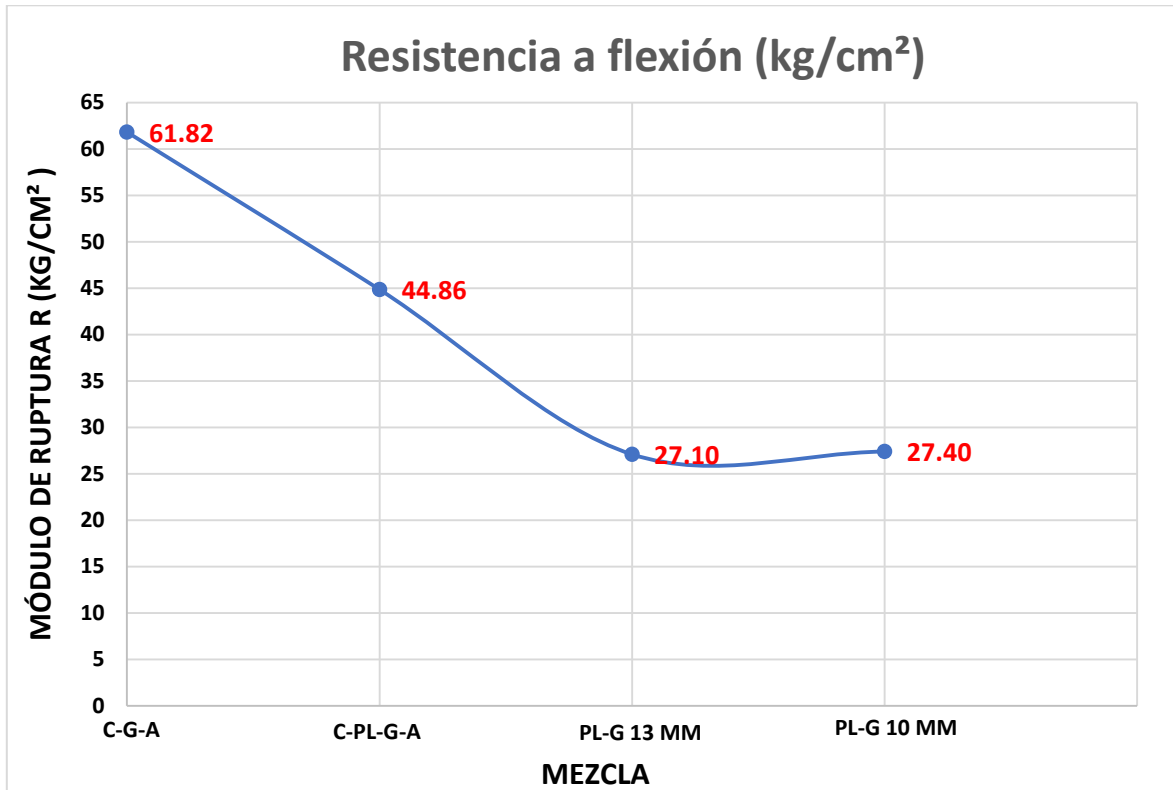


Figura 66. Gráfico de resistencia a flexión pura en mezclas de concreto.

4.3.7 Mecánica de fractura en probetas de concreto.

Al momento de ensayar los cilindros de concreto se observaron los modos de falla de las diferentes mezclas y se compararon con los patrones descritos en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002 y que se muestran a continuación:

- Se observa cuando se logra una carga de compresión bien aplicada sobre el espécimen de prueba bien preparado.
- Se observa comúnmente cuando las caras de aplicación de carga se encuentran en el límite de tolerancia especificada o excediendo éste.
- Se observa en especímenes que presentan una superficie de carga

convexa y/o deficiencia del material de cabeceo; también por concavidad del plato del cabeceo o convexidad en una de las placas de carga.

- d) Se observa en especímenes que presentan una cara de aplicación de carga cóncava y/o por deficiencia del material de cabeceo o también con concavidad en una de las placas de carga.
- e) Se observa cuando se produce concentración de esfuerzos en puntos salientes de las caras de aplicación de carga por deficiencia del material de cabeceo o rugosidad en el plato de cabeceo o placas de carga.
- f) Se observa en especímenes que presentan una cara de aplicación de carga convexa y/o por deficiencias del material de cabeceo o placas de carga.
- g) Se observa cuando las caras de aplicación de carga de espécimen se desvían ligeramente de las tolerancias del paralelismo establecido o por ligeras desviaciones en el centrado del espécimen para la aplicación de carga.



a)



b)



c)



d)



e)

f)

g)

Figura 67. Diagramas de fallas de cilindros en prueba de compresión.



Figura 68. Falla de cilindro #2 de concreto en prueba de compresión (Fuente propia).



Figura 69. Falla de cilindro #4 de concreto en prueba de compresión (Fuente propia).



Figura 70. Restos de probetas de cilindros de concreto en prueba de compresión (Fuente propia).



Figura 71. Falla de cilindro #2 de concreto base PL en prueba de compresión, agregado fino (Fuente propia).



Figura 72. Falla de cilindro #6 de concreto base PL en prueba de compresión, agregado grueso (Fuente propia).



Figura 73. Falla de cilindro #10 de concreto base PL en prueba de compresión, agregado grueso (Fuente propia).

Como puede observarse en las figuras anteriores los cilindros de concreto base cemento hidráulico tuvieron una falla del tipo a) que es del tipo de falla conocido como reloj de arena. Por lo que se puede decir que la elaboración de la mezcla y de las probetas fueron satisfactorios.

Por otro lado, los cilindros de mezclas a base de PL tuvieron fallas distintas, pero más apegadas a los diagramas tipo b) y g). También se observó que durante los ensayos al momento de la falla las probetas base PL fallaban de manera repentina o súbita.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos nos muestran un material sustentable con posibilidades de incursionar en el mercado de la construcción, únicamente se lograron relacionar valores de densidad, absorción, peso volumétrico en estado fresco, resistencia a la compresión y flexión para mezclas con un máximo de 25% de sustitución de cemento portland, dado que después de este porcentaje no se pudo obtener una mezcla en estado seco con la cohesión suficiente para manejarse. Después de este rango solo se elaboraron mezclas con 100% PL como cementante, obteniendo resistencias considerables.

El poliestireno expandido se pudo disolver fácilmente en la mezcla de acetona / acetato de etilo. Una vez en estado seco se tuvo una densidad promedio de 604 kg/m^3 , lo que nos habla de que el material se vuelve mucho más compacto ya que el aire sale de su estructura, se obtuvo una resistencia a la compresión bastante aceptable de 105 kg/cm^2 .

Se obtuvieron densidades menores en las mezclas que contienen PL, en el caso de los morteros se obtuvieron densidades del orden de 1100 kg/m^3 , esto es un 35% más ligero que las mezclas convencionales a base de cemento hidráulico. Se obtuvieron resistencias a compresión del orden de 60 kg/cm^2 , lo cual está dentro de los rangos de la resistencia de piezas de mampostería. Esto se obtuvo con las mezclas con concentración de 20% y 25% de EPS diluido en la mezcla de solventes, lo anterior hace candidatos a estos materiales a ser utilizados para la fabricación de elementos prefabricados como tabiques, blocks y blocks ligeros; ya que tienen una buena resistencia y la ligereza de la mezcla permite que su manejo sea más fácil.

En el caso de las mezclas de concreto se obtuvieron densidades del orden de 1370 y 1660 kg/m^3 para las mezclas que contenían PL al 100% como cementante, absorciones del orden de 4% y se logró obtener resistencias considerables de 113 kg/cm^2 en promedio. Cabe señalar que estas mezclas de concreto llevadas a cabo se pueden usar de la misma manera que las mezclas de mortero, como mezclas para elaborar piezas de mampostería, proporcionando

mayor ligereza y menos absorción que las piezas convencionales a base de arcillas o las piezas a base de concreto hidráulico.

En ambos casos las mezclas en las que se combinó 75% cemento portland y 25% PL se obtuvieron mezclas más fluidas y resistencias de 58 kg/cm² para el caso de la mezcla de mortero y de 133 kg/cm² en el caso de la mezcla de concreto, comparando los resultados con las mezclas que contienen el 100% de cemento portland se puede apreciar un decremento en la resistencia del 33% y 34% respectivamente, esto se debe a que el polímero inhibe el proceso de curado del cemento portland.

Trabajos por realizar:

Debido a que en este documento de tesis abarca solo algunas variables mecánicas del material se considera que restan algunos trabajos por realizar tal como:

- Evaluar la transferencia de calor de las mezclas para su posible aplicación como recubrimientos o rellenos aislantes.
- Evaluar la transmisión acústica de las mezclas.
- Evaluar si es viable económicamente o si las mezclas se pueden realizar usando otro tipo de solventes más económicos, así como incursionar en otro método de reciclaje del EPS.
- Realizar una pequeña construcción para evaluar el comportamiento, uso y aplicación de las mezclas.

6. REFERENCIAS

ACI 211.1-97 (2002). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.

Araiza, L. (2012). Producción y contaminación de unicel en México. El Sol de León. <http://www.oem.com.mx/elsoldeleon/notas/n2793509.htm> (Fecha de consulta 01/11/2016).

ASTM-C-67-03 (2003). Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile.

ASTM C-78-02 (2002). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).

ASTM C 1437-01 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.

ASTM D 695 – 02 a (2002) Standard Test Method for Compressive properties of rigid plastics.

Babu, K. G., & Babu, D. S. (2003). Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume, 33, 755–762. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01055-4](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01055-4)

García Díaz, Oscar, Tesis: Mortero ligero para su uso en la industria de la construcción, Universidad Autónoma de Querétaro; Querétaro, 2011.

Grupo Calidra Química Natural (2017). ¿Qué es mortero y cómo funciona? Usos de la cal. <http://calidra.com/usodelacal/mortero/> (Fecha de consulta 28/09/2017).

Godoy Lara, Héctor Mauricio, Tesis: Caracterización térmica, acústica y mecánica de un mortero celular ecológico, Universidad Autónoma de Querétaro; Querétaro, 2014.

Habert, G. (2013). *Environmental impact of Portland cement production 2013 Eco-Efficient Concrete.pdf*. Zürich, Switzerland. <http://doi.org/10.1533/9780857098993.1.3>

Hernández-Zaragoza, J. B., López-Lara, T., Horta-Rangel, J., López-Cajún, C., Rojas-González, E., & Adué, J. (2013). Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1155/2013/160162>

Hernández, J. B., López, T., Martínez, G., & Menchaca, C. (2005). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción* (OmniScience). Barcelona, España.

ISO 679, Cement – Test Methods – Determination of Strength, International Organization for Standardization, 2009.

Juárez-Badillo, E., & Rico-Rodríguez, A. (2005). *Fundamentos de Mecánica de Suelos, Tomo 1*. (Limusa). D.F., México.

Kan, A., & Demirboğa, R. (2009a). A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(6), 2994–3000. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.017>

Kan, A., & Demirboğa, R. (2009b). A novel material for lightweight concrete production. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), 489–495. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.002>

Kuhail, Z. (2001). Polystyrene Lightweight Concrete (Polyconcrete), 15. Retrieved from https://journals.najah.edu/media/journals/full_texts/polystyrene-lightweight-concrete-polyconcrete.pdf

Laukaitis, A., Zurauskas, R., & Kerien, J. (2005). The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties, 27, 41–47. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.09.004>

Mansour, M., & Mohammed, K. (2002). Study the Effect of Polystyrene on Some Mechanical Properties of Concrete. Retrieved from http://repository.uobabylon.edu.iq/journal_view.aspx?dpp=207

Nilson, A. H. (2010). *Diseño de Estructuras de Concreto* (14th ed.). Nueva York: Mc Graw Hill.

Reglamento de Construcción del Distrito Federal. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Elementos de Mampostería. 2004.

Ricciardi, P., Belloni, E., & Cotana, F. (2014). Innovative panels with recycled materials : Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment. *Applied Energy*, 134, 150–162. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.112>

N-CMT-2-02-001-02 (2002). Características de los materiales. Materiales para estructuras. Materiales para Concreto Hidráulico. 001 calidad del Cemento Portland.

NMX-C-083-ONNCCE-2002 (2002). Industria de la Construcción. Concreto Hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto. Método de Prueba.

NMX-C-111-ONNCCE-2004 (2004). Industria de la Construcción. Agregados para Concreto Hidráulico, especificaciones y métodos de prueba.

NMX-C-156- ONNCCE-2010 (2010). Industria de la Construcción. Concreto Hidráulico. Determinación del Revenimiento del Concreto Fresco.

NMX-C-486-ONNCCE-2014 (2014). Industria de la Construcción. Mortero para uso estructural, especificaciones y métodos de prueba.

Sayadi, A. A., Tapia, J. V, Neitzert, T. R., & Clifton, G. C. (2016). Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance , thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 716–724. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218>

Schmidt, P. N. S., Cioffi, M. O. H., Voorwald, H. J. C., & L, J. (2011). Flexural Test On Recycled Polystyrene. *Procedia Engineering*, 10, 930–935. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.153>

Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Cement and Concrete Research Sustainable cement production — present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642–650. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>

7. ANEXO 1. TERMINOLOGÍA EMPLEADA

EPS: Poliestireno Expandido.

PS: Polímero Sustentable.

PL: Poliestireno Líquido.

PVC: Policloruro de Vinilo.

WBCSD: World Business Council For Sustainable Development.

RCDF: Reglamento de Construcción del Distrito Federal.

NTC: Normas Técnicas Complementarias.

RMPE: Residuos Modificados de Poliestireno Expandido.

ATG: Análisis Termogravimétrico.

CDB: Calorimetría Diferencial de Barrido.

ASTM: American Standard Test Method.

NMX: Norma Mexicana.

ONNCCE: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.

P. V. S.: Peso Volumétrico Seco.

P. V. S. S.: Peso Volumétrico Seco Suelto.

P. V. S. C.: Peso Volumétrico Seco Compacto.

Cu: Coeficiente de Uniformidad.

Cc: Coeficiente de Curvatura.

CPC: Cemento Portland Compuesto.

ACI: American Concrete Institute.