

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MORTERO LIGERO PARA SU USO EN LA INDUSTRIA
DE LA CONSTRUCCIÓN.**

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

Arq. OSCAR GARCÍA DÍAZ

Expediente 190578

DIRIGIDO POR:

Dr. JUAN BOSCO HERNÁNDEZ ZARAGOZA



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias – Construcción

MORTERO LIGERO PARA SU USO EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Arq. Oscar García Díaz

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

SINODALES

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Presidente

Dr. Jaime Horta Rangel
Secretario

Dra. Teresa López Lara
Vocal

M.I Rubén Ramírez Jiménez
Suplente

M.C. Aleyda Coronado Márquez
Suplente

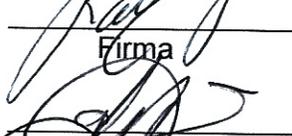
Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

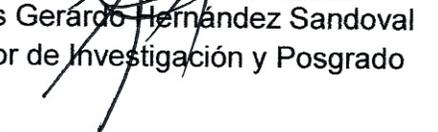

Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre 2011
México

RESUMEN

Esta investigación se enfoca en la realización de un mortero ligero con poliestireno reciclado, se centra en obtener un material con similares propiedades mecánicas a los materiales tradicionales, pero con un peso menor. Para tal efecto, se diseñó una mezcla de control con una pasta de agua y cemento portland de acuerdo a los estándares del ACI (American Concrete Institute), y a partir de la mezcla de control, se elaboraron tres diferentes mezclas sustituyendo cemento Portland en tres diferentes proporciones, utilizando como agregado el poliestireno reciclado. La trabajabilidad, resistencia a compresión, fueron determinantes para comparar el efecto del poliestireno reciclado en los diferentes grupos de mezclas elaboradas. Los resultados muestran un decremento de la resistencia de todas las mezclas en comparación a la mezcla base, sin embargo el peso se encuentran por debajo del espécimen base.

SUMMARY

This work focuses on the implementation of a lightweight mortar with recycled polystyrene, with the objective of obtaining a material with similar mechanical properties to traditional materials, but with less weight. To this end, we designed a control mixture with a paste of water and Portland cement according to the standards of ACI (American Concrete Institute), and from the mixture of control, three different mixtures were prepared by replacing Portland cement in three different proportions, using recycled polystyrene aggregate. The workability, compressive strength, was crucial to compare the effect of recycled polystyrene in different groups of mixtures prepared. The results show a decrease in the strength of all blends in comparison to the base mixture.

DEDICATORIAS

Este trabajo se lo dedico a todas las personas que sin ninguna obligación me han dado su amistad, apoyo, ánimo y compañía a lo largo de mi vida. A todos los que se encuentran aquí conmigo y los que se encuentran en mis recuerdos y en mi corazón. Para ustedes; Abuelos, Padres, Hermanos, Tíos, Primos,
Amigos....

Muchas Gracias...

AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza**, por creer en mí para la realización de esta investigación, por su dirección y crítica al trabajo de tesis. Pero sobre todo gracias por brindarme su amistad.

A mis padres **ISABEL y ADOLFO**, por ser los pilares más importantes de mi vida, a ellos que me vieron nacer y que gracias a sus enseñanzas y sus buenas costumbres han creado a la persona que ahora soy. Que con el paso del tiempo me demuestran su cariño, amor y apoyo para seguir a delante.

A mis hermanos **YURITZI, ISAAC y ADOLFO**, por ser como son, por ayudarme y no permitir que baje los brazos, por darme su apoyo, fuerza, tenacidad, cariño y amor, por compartir momentos extraordinarios, por ser mis hermanos.

Al **Dr. José Luís Reyes Araiza**, por su apoyo, paciencia y aportación a la investigación. Gracias por brindarme su tiempo y amistad.

A mis sinodales; **M.C. Aleyda Coronado Márquez, Dra. Teresa López Lara, M.I Rubén Ramírez Jiménez, Dr. Jaime Horta Rangel**, por sus valiosas aportaciones y comentarios.

Le agradezco a la **Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ)** y al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por otorgarme la beca durante estos dos años de investigación.

"A mis **profesores, amigos...**

...y todos aquellos que hicieron posible
la elaboración de este trabajo."

ÍNDICE

	Página
Resumen.....	i
Summary.....	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice.....	v
Índice de tablas.....	ix
Índice de figuras	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema.....	5
1.2 Línea de investigación.....	6
1.3 Objetivos generales.....	7
1.4 Objetivos específicos.....	8
II. ESTADO DEL ARTE	9
2.1 El Concreto ligero.....	9
2.1.1 Los agregados ligeros.	11
2.1.2 Agregado grueso.....	13
2.1.3 Agregado fino.....	14
2.1.4 Agregados naturales.....	15
2.1.5 Los agregados artificiales.....	16
2.2 Clasificación de los concretos ligeros.....	19
2.2.1 Clasificación del concreto ligero dependiendo del método de fabricación.....	20
2.2.2 Concreto sin finos.....	21
2.2.3 Concreto con agregados de peso ligero.....	21
2.2.4 Concreto con aire incluido o celular.....	21
2.2.5 Clasificación del concreto ligero dependiendo de su aplicación.....	22

2.2.6 Aplicación del concreto ligero como material aislante.....	22
2.2.7 Concreto ligero estructural.....	22
2.3 Concreto celular.....	25
2.4 Propiedades del concreto con aire incluido.	28
2.4.1 Reducción de la carga muerta.....	29
2.4.2 Aislamiento térmico.....	30
2.4.3 Resistencia al fuego.....	33
2.4.4 Absorción del agua.	34
2.4.5 Durabilidad.....	35
2.4.6 Aislamiento acústico.....	36
2.4.7 Trabajabilidad.....	36
2.4.8 Manejabilidad.....	38
2.4.9 Resistencia a la compresión.....	39
2.4.10 Densidad.....	41
2.5 Comparación entre el concreto celular elaborado con espuma preformada con respecto a otros tipos de concreto celular.....	42
2.6 Aplicaciones en la construcción de prefabricados para viviendas.....	44
2.7 Dosificación.....	45
2.8 Comparación entre concreto o mortero normal y uno ligero.....	46
2.9 Empresas fabricantes de morteros y concretos ligeros.....	47
2.9.1 HEBEL.....	47
2.9.2 CELDACRET.....	48

III. EXPERIMENTACIÓN

51

3.1 Metodología experimental.....	51
3.1.1 Trabajos previos a la experimentación.....	51
3.1.2 Etapa general.....	52
3.1.3 Etapa final.....	52
3.2 Materiales.....	53
3.3 Equipo.....	54

3.3.1 Equipo manual.....	54
3.3.2 Equipo mecánico.....	54
3.4 Desarrollo de mezcla.....	55
3.4.1 Etapa preliminar y general.....	55
3.4.1.1 Desarrollo mezcla base.....	56
3.4.1.2 Desarrollo de mezclas con diferentes proporciones.....	62
3.4.2 Etapa Final.....	63
3.4.2.1 Desarrollo de la mezcla.....	64
3.5 Pruebas.....	69
3.5.1 Prueba para obtener la resistencia a la flexión para bloques de mampostería (ASTM C293-02)	69
3.5.2 Prueba para obtener la resistencia a la compresión para bloques de mampostería (ASTM C1314-03).....	70
3.5.3 Prueba para obtener la absorción inicial y coeficiente de saturación.....	71
3.5.3.1 Prueba de absorción en 24 horas.....	72
3.5.3.2 Prueba para obtener el coeficiente de saturación.....	72
3.5.3.3 Prueba para obtener la tasa inicial de absorción.....	73
3.5.3 Prueba para obtener el coeficiente de conductividad térmica.....	73
3.5.3 Reacción al fuego.....	75
3.5.3 Porosidad.....	76

IV.DOSIFICACIONES Y RESULTADOS

EXPERIMENTALES

77

4.1 Dosificaciones morteros, etapa preliminar.....	77
4.1.1 Dosificaciones prueba base, etapa preliminar.....	77
4.1.1.1 Resultados prueba base, etapa preliminar.....	78
4.1.2 Primera dosificación con poliestireno reciclado etapa general.....	80
4.1.2.1 Resultados primera dosificación con poliestireno reciclado, etapa general.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efecto del aire incluido sobre las propiedades del concreto (PCA, 2004, p.162).....	28
Tabla 2. Valores de conductividad y resistividad térmica de diferentes tipos de concreto ligero (Concretos Celulares Ltda., 2009.....	31
Tabla 3. Valor de resistencia térmica “U” de algunos sistemas de muro (Concretos Celulares Ltda., 2009)	32
Tabla 4. Coeficiente de conductividad térmica, “K” para densidades mayores a 1200 kg/m ³ de concreto celular (Cellular Concrete LLC, 2009).....	33
Tabla 5. Resistencia al fuego de diferentes tipos de concreto ligero (Gustaferro, Abrams y Litvin, 1970).....	34
Tabla 6. Densidades y resistencias del concreto celular elaborado con espuma preformada (Cellular Concrete LLC, 2009.....	39
Tabla 7. Aplicaciones del concreto celular con espuma preformada dependiendo de la densidad (Concretos Celulares Ltda., 2009).....	42
Tabla 8. Dosificación prueba base.....	77
Tabla 9. Resultados y propiedades de pruebas base a 7 días de curado por inmersión total.....	78

Tabla 10. Resultados y propiedades de pruebas base a 14 días	
de curado por inmersión total.....	78
Tabla 11. Resultados y propiedades de pruebas base a 28 días	
de curado por inmersión total.....	79
Tabla 12. Primera dosificación con poliestireno reciclado	80
Tabla 13. Resultados y propiedades de la primera dosificación a 7 días	
de curado por inmersión total.....	80
Tabla 14. Resultados y propiedades de la primera dosificación a 14 días	
de curado por inmersión total.....	81
Tabla 15. Resultados y propiedades de la primera dosificación a 28 días	
de curado por inmersión total.....	81
Tabla 16. Segunda dosificación con poliestireno reciclado.....	82
Tabla 17. Resultados y propiedades de la segunda dosificación a 7 días	
de curado por inmersión total.....	83
Tabla 18. Resultados y propiedades de la segunda dosificación a 14 días	
de curado por inmersión total.....	83
Tabla 19. Resultados y propiedades de la segunda dosificación a 28 días	
de curado por inmersión total.....	84
Tabla 20. Tercera dosificación con poliestireno reciclado.....	85

Tabla 21. Resultados y propiedades de la tercera dosificación a 7 días de curado por inmersión total.....	85
Tabla 22. Resultados y propiedades de la tercera dosificación a 14 días de curado por inmersión total.....	86
Tabla 23. Resultados y propiedades de la tercera dosificación a 28 días de curado por inmersión total.....	86
Tabla 24. Resultados Dosificación para bloques de mampostería.....	88
Tabla 25. Resultados bloques de mampostería a 7 días de curado.....	89
Tabla 26. Resultados bloques de mampostería a 14 días de curado.	90
Tabla 27. Resultados bloques de mampostería a 28 días de curado.	91
Tabla 28. Desviación estándar para bloques de mampostería a 7 días de curado.....	92
Tabla 29. Desviación estándar para bloques de mampostería a 14 días de curado.	92
Tabla 30. Desviación estándar para bloques de mampostería a 28 días de curado.....	92
Tabla 31. Resultados de prueba térmica.....	95
Tabla 32. Coeficiente térmico de los materiales.....	96
Tabla 33. Coeficiente de porosidad de algunos materiales.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Densidades de concreto con diversos agregados ligeros (Neville, 1992).....	11
Figura 2. Clasificación de los morteros ligeros en función de la forma de introducir aire en su estructura. (Organista, 1999, p.2-2).....	13
Figura 3. Relación entre el tamaño del agregado, el contenido del cemento y el contenido de aire en el concreto (PCA Major Series 336).....	13
Figura 4. Relación entre el porcentaje de agregado fino y el contenido de aire en el concreto (PCA Major Series 336).....	14
Figura 5. Clasificación de los agregados ligeros (Elizondo, 2006, p.7).....	15
Figura 6. Métodos de fabricación de concreto ligero (Elizondo, 2006)	20
Figura 7. Vista microscópica de las partículas de diferentes tipos de concreto ligero (Concretos Celulares, Ltda., 2004).....	22
Figura 8. Relación entre el contenido de aire y la resistencia a compresión a los 28 días entre concretos con tres contenidos de cemento diferentes (Cordon, 1946).....	23
Figura 9. Tipo de concreto ligero, según el tipo de agregado... ..	24

Figura 10. Cavidades del mortero celular originadas por burbujas de aire (The Aberdeen Group, 1963).....	25
Figura 11. Construcción de un muro utilizando bloques de mortero celular HEBEL (HEBEL, 2009).....	30
Figura 12. Relación entre el contenido de agua y el contenido de arena obtenidos de varios niveles de contenidos de aire y cemento (Gilkey, 1985).....	37
Figura 13. Colocación de piezas de mortero celular (HEBEL, 2009).....	38
Figura 14. Relación entre resistencia a compresión a los 28 días y la relación agua-cemento.....	40
Figura 15. Relación entre la resistencia a compresión a los 90 días y el contenido de aire (Pinto y Hover, 2001).....	41
Figura 16. Dosificaciones básicas iniciales para producir un metro cúbico de concreto celular.....	45
Figura 17. Cono y mesa de fluidez (foto tomada en la UAQ).....	56
Figura 18. Báscula mecánica, utilizada para pesar el cemento (foto tomada en la UAQ).....	57
Figura 19. Probeta 100 ml. utilizada para medir el agua (foto tomada en la UAQ).....	57

Figura 20. Moldes cúbicos de 5 cm por lado engrasados (foto tomada en la UAQ).....	57
Figura 21. Charola para mezclado (foto tomada en la UAQ).....	58
Figura 22. Charola con el cemento (foto tomada en la UAQ)....	58
Figura 23. Charola con el cemento y agua (foto tomada en la UAQ).....	58
Figura 24. Mesclado del cemento y el agua (foto tomada en la UAQ).....	59
Figura 25. Vaciado de la pasta, primera parte (foto tomada en la UAQ).....	59
Figura 26. Vaciado de la pasta, segunda parte (foto tomada en la UAQ).....	59
Figura 27. Descimbrado de moldes (foto tomada en la UAQ).....	60
Figura 28. Curado de especímenes (foto tomada en la UAQ).....	60
Figura 29. Bascula digital (foto tomada en la UAQ).....	61
Figura 30. Máquina Universal Tinius Olsen (foto tomada en la UAQ).....	61
Figura 31. Bascula digital (foto tomada en la UAQ).....	62
Figura 32. Poliestireno agregado a la pasta (foto tomada en la UAQ).....	62
Figura 33. Mezcla de las pasta con el poliestireno (foto tomada en la UAQ).....	63
Figura 34. Báscula mecánica, utilizada para pesar el cemento (foto tomada en la UAQ).....	64
Figura 35. Báscula digital, utilizada para pesar el poliestireno (foto tomada en la UAQ).....	65

Figura 36. Probeta 100 ml. utilizada para medir el agua (foto tomada en la UAQ).....	65
Figura 37. Moldes cúbicos de 5 cm por lado engrasados (foto tomada en la UAQ).....	65
Figura 38. Charola para mezclado (foto tomada en la UAQ).....	66
Figura 39. Charola con el cemento (foto tomada en la UAQ).....	66
Figura 40. Charola con el cemento y agua (foto tomada en la UAQ).....	66
Figura 41. Mezclado del cemento y el agua (foto tomada en la UAQ).....	67
Figura 42. Poliestireno agregado a la pasta (foto tomada en la UAQ).....	67
Figura 43. Mezcla de las pasta con el poliestireno (foto tomada en la UAQ).....	67
Figura 44. Vaciado de la pasta, primera parte (foto tomada en la UAQ).....	68
Figura 45. Vaciado de la pasta, segunda parte (foto tomada en la UAQ).....	68
Figura 46. Descimbrado de moldes (foto tomada en la UAQ).....	68
Figura 47. Curado de especímenes (foto tomada en la UAQ).....	69
Figura 48. Prueba resistencia a flexión (foto tomada en la UAQ).....	70
Figura 49. Prueba resistencia a compresión (foto tomada en la UAQ).....	71
Figura 50. Prueba conductividad térmica.....	74
Figura 51. Gráfica de resultados a compresión.....	79
Figura 52. Gráfica de resultados a compresión con poliestireno reciclado.....	82

Figura 53. Gráfica de resultados a compresión con poliestireno reciclado.....	84
Figura 54. Gráfica de resultados a compresión con poliestireno reciclado.....	87
Figura 55. Gráfica de desviación estándar de resistencia a flexión.....	93
Figura 56. Gráfica de desviación estándar de resistencia a compresión.....	93
Figura 57. Gráfica de desviación estándar de % de absorción inicial de agua.....	94
Figura 58. Gráfica de desviación estándar de % de absorción final 24 horas.....	94
Figura 59. Bloque en horno a 110°C.....	97
Figura 60. Bloque sometido al fuego de manera directa.....	97

I. INTRODUCCIÓN

Sin lugar a duda uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción es el cemento, material de construcción formado por un polvo finamente molido, compuesto por silicatos de calcio y, en menores proporciones por aluminatos de calcio que, al ser mezclados con agua, producen una pasta que fragua y endurece. Este resistente material debe su nombre a lo que los romanos denominaban “opus caementitium”, que del latín al español es traducible como “obra cementicia”. Los romanos llamaban así a una mezcla de grava y otros materiales similares al concreto que utilizaban para fabricar los morteros.

La combinación del cemento con diferentes agregados, ya sean finos, gruesos o ambos nos da como resultado, mortero o concreto, según sea el caso.

El mortero es un material pétreo, que se produce mediante la mezcla de tres materiales esenciales (inertes y granulares, debidamente graduados), cemento, agua y agregados, (en algunas ocasiones se le agrega cal), a estos se les suele agregar un cuarto elemento conocido como aditivo, pero al mezclar todos los componentes se introduce de manera simultánea un quinto elemento, el aire.

Como otro producto resultante de la mezcla básica de dos componentes, agregados y pasta, se originó el concreto. La pasta compuesta de cemento y agua, une a los agregados, ya sea grueso (grava) o fino (arena), produciendo una reacción química que permite el endurecimiento de los materiales formando una masa con características similares a las de una roca.

Gracias a estos dos materiales, el mortero y el concreto, el ser humano ha podido dar a nuestro mundo una fisonomía diferente, convirtiendo a estos materiales en universales en la industria de la construcción, facilitando la creación de obras civiles y arquitectónicas de diferentes formas y proporciones.

El ser humano ha tratado de crear e innovar nuevos materiales de construcción con mejores ventajas en cuanto a su: resistencia, ligereza, manejabilidad,

permeabilidad, y con propiedades térmicas y acústicas, pero siempre ligado a un menor costo. Es por eso que se han desarrollado concretos y morteros con dosificaciones que contengan agregados más ligeros que los tradicionales (grava y arena), permitiendo obtener un concreto o un mortero con un peso por debajo de los tradicionales pero con similar resistencia. Algunos de estos tipos de agregados los podemos encontrar de forma natural o artificial.

Un concreto o mortero ligero se puede realizar de diferentes maneras y básicamente depende de un factor que es el aire. Es decir, la forma para disminuir la densidad del material está en incluir aire a su estructura.

Una de estas formas es el sustituir el agregado grueso por aire. Al incluir el aire en la estructura del material nos da como resultado burbujas dentro del concreto o mortero ocupando espacio en la mezcla y al fraguar, las células de aire serán las que permitan una mayor ligereza del material. A este tipo de concreto ligero se le denomina 'Concreto Celular'. La densidad del concreto celular se encuentra en un rango de 300 a 1800 kg/m³ obteniéndose una resistencia de hasta 210 kg/cm² (Neville, 1992). Si consideramos que para la construcción de una vivienda se requieren de resistencias de 150 a 210 kg/cm², el concreto celular es una buena opción. En morteros celulares la resistencia será menor pero relativamente igual a los morteros convencionales.

Fue a finales del siglo XIX en Estados Unidos e Inglaterra, cuando se empezó a utilizar principalmente el concreto ligero. En estos países se realizó una dosificación sustituyendo los agregados comunes, por la escoria de hulla (carbón). Este material se empleó para la realización, tanto de obras de bajo costo como de viviendas, así como en edificaciones y monumentos arquitectónicos.

Al mismo tiempo del desarrollo del concreto ligero con sustitución de agregados ligeros, se fue desarrollando el concreto con aire incluido, concreto celular. El concreto celular se desarrolló en Suecia en 1929 mediante una bomba generadora de espuma. Sin embargo antes de la Primera Guerra Mundial, en Inglaterra se habían desarrollado bloques para muros no estructurales a base de

espuma, mortero celular. Gracias a la aceptación del mortero celular se realizaron piezas reforzadas.

En diferentes países europeos como Inglaterra y Alemania se empezó a realizar el concreto y el mortero celular sustituyendo los agregados tradicionales por agregados ligeros comunes de la región, pero su gran demanda provocó que éstos escanciaran, en Inglaterra la escoria de termoeléctricas a base de carbón y en Alemania la piedra pómez. Por la escasez de materiales ligeros, se optó por el desarrollo de concretos y morteros a base de espumas, en Alemania se optó por materiales alternativos tales como los agregados a base de espumas y en Inglaterra se desarrolló por medio de espumas jabonosas que permiten la encapsulación del aire.

Estados Unidos es el país que desarrolló los agregados ligeros a base de agentes espumantes, con mayor rapidez que otros países europeos. La gran extensión de este país provoca altos costos en la transportación de los materiales pesados tradicionales al sitio de la obra. Estados Unidos cuenta con grandes cantidades de agregados ligeros, pero la distancia que existe entre éstos y la obra o los centros de prefabricado, provoca que resulte mucho más económico realizar agregados a base de agentes espumantes producidos en el mismo sitio de la obra.

En Latinoamérica, el desarrollo del concreto celular ha alcanzado un buen nivel de aceptación y de producción. En Brasil el concreto celular ha alcanzado un auge importante, habiéndolo utilizado en monumentos y estatuas ostentosas de gran tamaño y poco peso, ahora es utilizado en viviendas de nivel social alto para la fabricación de muros aislantes térmicos y acústicos. En Argentina el concreto celular ha sido implementado a través de bombas generadoras de espuma para la construcción de bloques de gran tamaño y poco peso. En Venezuela se emplea el concreto celular para la fabricación de vivienda industrializada, losas de pavimentación y rellenos, a pesar de ser más económico que el concreto

convencional, en ese país se vende a un mayor costo debido a la explotación de sus ventajas térmicas y acústicas (Chandra y Bemtsson, 2003).

Sin lugar a duda el concreto celular y el mortero celular son materiales que han tenido una gran aceptación dentro de la industria de la construcción gracias a las numerosas ventajas que ofrece. Utilizar un concreto o un mortero celular, nos permitirá reducir las cargas muertas de nuestra estructura provocando la disminución en cuanto al costo de nuestra cimentación. La baja densidad del material nos permite reducir tiempos en la transportación del material a la obra, ya que nuestro transporte podrá cargar mayor número de bloques o paneles, disminuyendo también el costo de flete. Por otro lado este tipo de material posee gran nivel de aislamiento térmico y acústico en comparación con otros materiales.

En nuestro país existen diferentes industrias que comercializan el concreto y el mortero celular, CEMEX (Cementos Mexicanos), CONCRESA y HEBEL. CEMEX y CONCRESA ofrecen el servicio de concreto móvil, el cual puede ser colado en sitio. HEBEL utiliza tecnología Alemana, ofreciendo un sistema constructivo a base de blocks y paneles ligeros, productos prefabricados que no pueden producirse en sitio, ya que las dosificaciones se tienen que realizar en planta y pasar por un sistema de calidad, provocando que el costo sea mucho mayor.

Cabe mencionar que existen dos procesos para la fabricación del concreto celular: el método químico y el método espumoso. El método químico consiste en añadir aditivos químicos (polvo de Aluminio) que al reaccionar con la mezcla de concreto producen un gas (hidrógeno) lo cual permite ocupar cierto volumen de aire; el segundo método consiste en producir espuma la cual se puede añadir a la mezcla de dos formas, de manera interna o externa. Las espumas tienen como objetivo atrapar el aire del ambiente y homogeneizarlo en la mezcla. Sin embargo, el concreto celular elaborado con gas tiene la desventaja de ser estrictamente producido en planta debido a que requiere de un curado en autoclave para obtener su resistencia y durabilidad, por ello su alto costo; el concreto celular con espuma producida internamente tiene la desventaja de ser muy volátil en cuanto a

resistencia se refiere, por lo que es necesario un estricto control de la cantidad de aditivo añadido o la velocidad de mezclado. Mientras que el concreto con espuma preformada permite ser producido en obra y permite mayor manejabilidad durante su uso (Organista, 1999).

Hoy en día la creación de un concreto o mortero ligero ha dado un giro hacia la sustentabilidad, es decir se ha innovado para poder realizar un mortero o concreto ligero utilizando agregados reciclados o desechos industriales. Tratando de no sacrificar las ventajas de los morteros celulares o morteros ligeros que existen en el mercado.

Es por ello que esta investigación se enfoca en obtener un mortero ligero mediante el uso de poliestireno reciclado como agregado, para su uso en la industria de la construcción. Obteniendo así un material con similares propiedades mecánicas a los materiales tradicionales, pero con una densidad menor.

1.1. Descripción del problema.

Como ya se mencionó anteriormente, el mortero es un material que se compone principalmente de; agregados, cemento, agua, aditivos químicos (en algunas ocasiones) y aire que puede ser incluido deliberadamente o simplemente quedar atrapado.

Dentro de estas materias primas que producen el mortero, los agregados son el material que tiene mayor influencia para determinar el peso del mortero y esté a su vez es el que determina el peso de las estructuras.

Para obtener un buen mortero debe existir un equilibrio entre la economía, la resistencia, la densidad, la trabajabilidad, la apariencia y la durabilidad. Los agregados sin duda alteran en muchas medidas el equilibrio que puede existir, por ejemplo, el requerimiento de agua de un concreto aumenta dependiendo el tipo de agregado, es decir, si un agregado es de textura áspera, la cantidad de agua

aumentará. Provocando que se tenga que comprar más agua para producir ese tipo de mortero (economía). Por otro lado si el agregado es de textura lisa probablemente no tengamos que utilizar mucha agua, pero es probable que el peso del concreto se vea modificado, es decir su densidad será mayor.

Por otro lado el poliestireno expandido (unicel) es uno de los materiales menos amigables con el ambiente. Para producir poliestireno se usan recursos naturales no renovables, ya que es un plástico derivado del petróleo.

Sus inigualables prestaciones en términos de amortiguación, aislamiento térmico y protección han convertido al Poliestireno Expandido - EPS en un material de uso común, pero que en la actualidad existe poco interés por su reciclaje, provocando que vaya a dar a los tiraderos de basura, que cada día disminuyen su capacidad, además de ser un material no biodegradable.

En este proyecto de investigación se pugna por emplear agregados de poliestireno expandido (unicel) reciclado, para disminuir la densidad del concreto, y con esto obtener un material sustentable.

1.2. Línea de Investigación.

La necesidad del hombre por poseer una vivienda digna lo ha llevado a experimentar con 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 mortero convencional y de 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 el costo final de ejecución.

Por otro lado se puede mencionar que el diseño de una construcción y su costo se ven controlados fuertemente por el peso de la estructura. Es por ello que

se han desarrollado numerosos materiales que permiten reducir el peso de la estructura sin que se modifique la funcionalidad del inmueble.

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.

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

La utilización de bloques de mortero ligero en edificios de gran altura, reduce el costo y el peso propio de la estructura gracias a su baja densidad. 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. El mortero de baja densidad reduce estos tiempos de ejecución, reflejándolo en el costo final de la construcción.

Gracias a la incursión de aire incluido en el poliestireno, el mortero de baja densidad, trae beneficios de confort dentro de los espacios arquitectónicos, ya que este colchón de aire funciona como una barrera que impide la transmisión de sonidos, de igual manera funciona como barrera para impedir la pérdida o ganancia de temperatura.

1.3. Objetivo general

El objetivo de esta investigación es realizar un mortero más ligero que los convencionales, además de analizar las propiedades físicas y mecánicas del mortero con agregado de poliestireno reciclado, con el fin de encontrar las proporciones adecuadas, para que sea un material útil en la industria de la construcción.

1.4. Objetivos específicos

Analizar y comparar la resistencia a compresión de las mezclas con diferentes proporciones poliestireno reciclado y cemento, con la de mezclas comunes.

Analizar y comparar la transferencia de temperatura de nuestro mortero de baja densidad con agregados de poliestireno reciclado, con los materiales comunes.

II. ESTADO DEL ARTE

La revisión de la literatura utilizada para realizar esta investigación, se estructura de la siguiente manera.

Se parte de una breve descripción de los concretos ligeros y los tipos de agregados ligeros. Posteriormente se hablará de la clasificación de los concretos y morteros ligeros, además de su forma de clasificación. A continuación se describirá uno de los morteros ligeros más utilizados en la actualidad, el mortero aireado, así como las propiedades y ventajas de la utilización del mortero ligero. Por último se mencionarán algunas de las dosificaciones de los morteros ligeros y se hablará de empresas realizadoras de este tipo de material.

2.1. El concreto ligero

Pérez, Mireya (2006, junio) en su artículo “Un repaso al concreto celular” menciona que el concreto ligero se identificó durante muchos años como aquél cuya densidad superficialmente seca no fuese mayor a 1800 kg/m³. Sin embargo, con la introducción de miembros estructurales de concreto reforzado con agregados de peso ligero, esta densidad tuvo que ser revisada, pues algunas muestras de concreto producidas para este propósito tenían una densidad de 1840 kg/m³ o mayores. A pesar de esto, resultaba todavía bastante más ligero que el concreto común que usualmente pesa 2400 kg/m³.

Dado que no es posible definir específicamente a un concreto ligero como un concreto que no pese más de 1800 kg/m³, se ha sugerido definirlo como un concreto hecho a base de agregados de peso ligero o sin agregados que permitan obtener un peso menor al concreto convencional de 2400 kg/m³ (Chandra y Bemtsson, 2003).

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. Adicionalmente, el concreto ligero ofrece un mejor aislamiento térmico que el concreto normal lo cual permite un ahorro en energía en la utilización de sistemas de aire acondicionado ó calefacción. Lo anterior se puede visualizar si se advierte que un muro sólido de concreto ligero de 12 cm de espesor proporciona un aislamiento térmico aproximadamente cuatro veces mayor que el de una pared de ladrillo de 23 cm de espesor (Chandra y Bemtsson, 2003).

Luis García Showell, gerente técnico del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, dice: “proporciona un menor peso muerto, de tal forma que las estructuras son menos robustas y por lo tanto, requieren de un menor consumo de materiales en acero, cemento, grava, y arena de tal forma que los edificios, las casas unifamiliares, son más ligeras, por lo tanto más baratas”.

El concreto de agregado ligero comprende un campo de aplicaciones muy amplio. Si se emplean los materiales y métodos apropiados la densidad del concreto puede variar de 300 hasta unos 1850 kg/m³, y el rango correspondiente a su resistencia se encuentra entre 3.5 y 422 kg/cm², y en algunas ocasiones más elevado. Se pueden llegar a obtener resistencias de hasta 633 kg/cm² con contenidos altos de cemento, aproximadamente de 560 kg/m³ (Neville, 1992).

En la Figura 1 se muestra la variación normal de densidades de los concretos hechos con diversos agregados ligeros, basados principalmente en la clasificación del ACI de acuerdo al Comité ACI 313. En la figura se muestran tres tipos de aplicaciones del concreto ligero: concreto de baja densidad o aislante, concreto de resistencia media y concreto de uso estructural.

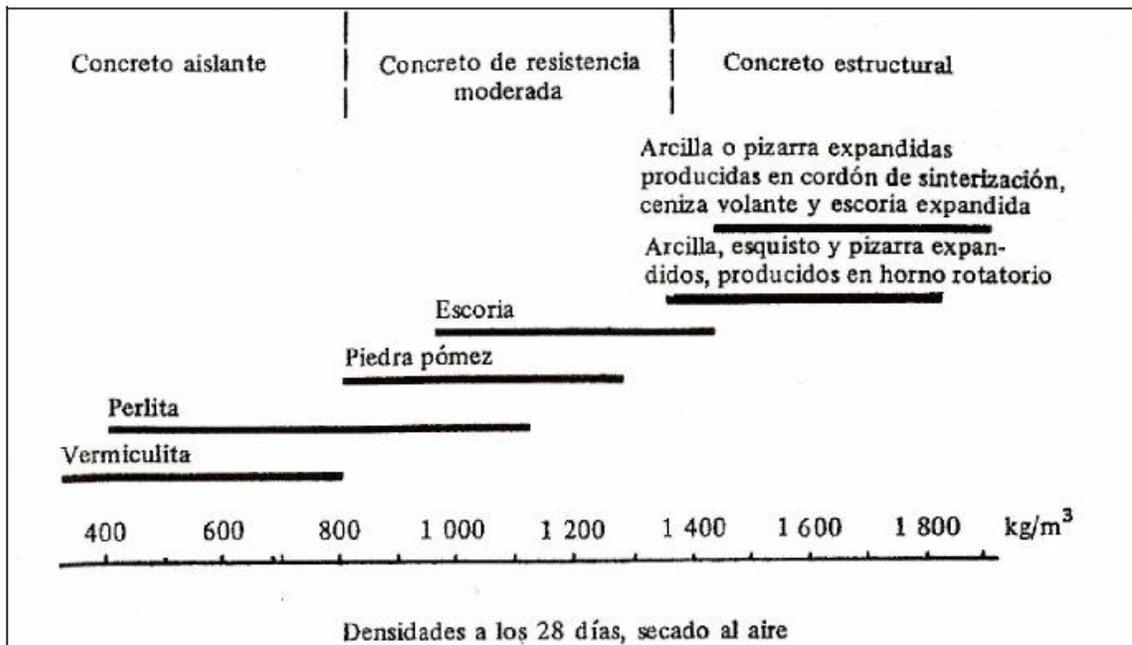


Figura 1. Densidades de concreto con diversos agregados ligeros (Neville, 1992).

2.1.1 Los agregados ligeros.

Los agregados ligeros son definidos como agregados de baja densidad y se clasifican de acuerdo a su origen, en naturales o artificiales. Los agregados ligeros se encuentran clasificados dependiendo su densidad y estos a su vez producen un tipo de concreto ligero diferente dependiendo su densidad: mortero ligero, concreto ligero o concreto estructural ligero. (ACI, 2007, p.21)

Es muy importante tomar en cuenta lo que nos dicen Neville (1992, p.119) en su libro Tecnología del Concreto, con referente a los agregado.

Puesto que el agregado ocupa, por lo menos, tres cuartas partes del volumen del concreto, no es de sorprender que su calidad revista considerable importancia. El agregado limita la resistencia del concreto, ya que un agregado débil no puede producir concreto resistente y, además, afecta mucho la durabilidad y el comportamiento estructural del concreto.

El agregado es el material que da mayor estabilidad de volumen y mejor durabilidad al mortero, que si se tuviera una pasta de cemento sola. Es un material cuyo peso es proporcional al peso del mortero.

La realización de un mortero ligero se puede realizar de diferentes maneras y básicamente depende de un factor que es el aire. Es decir, la forma para disminuir la densidad de un mortero está en incluir aire a su estructura. Con respecto a este punto Huerta, Raúl en su artículo “Concretos Ligeros” nos dice que: La disminución de la densidad de estos concretos se produce por una presencia de vacios en el agregado, en el mortero o entre las partículas de agregado grueso”. En la figura 2 se muestran las tres maneras para lograrlo y su combinación de estas.

Mortero sin finos: Omitiendo el agregado fino y las partículas de diámetro pequeño del agregado grueso, por consiguiente se eliminará el aire que se encuentre entre las partículas del agregado.

Mortero con agregados ligeros: Sustituyendo los agregados de grava o piedra triturada por agregados con estructura celular o porosa, los cuales incluyen aire dentro de la estructura del mismo agregado.

Mortero celular: Produciendo burbujas de aire, de tal manera que al fraguado quede una estructura celular llamada mortero celular o aireado.



Figura 2. Clasificación de los morteros ligeros en función de la forma de introducir aire en su estructura. (Organista, 1999, p.2-2)

2.1.2. Agregado grueso

El tamaño del agregado grueso tiene un gran efecto sobre el contenido de aire de ambos tipos de concreto, con y sin aire incluido, en la figura 3 nos muestra la relación entre el tamaño del agregado, el contenido de cemento y el contenido de aire en el concreto. Se denomina agregado grueso, al agregado que se encuentra entre 3/8" (0.95cm) y 2 1/2" (6.3cm).

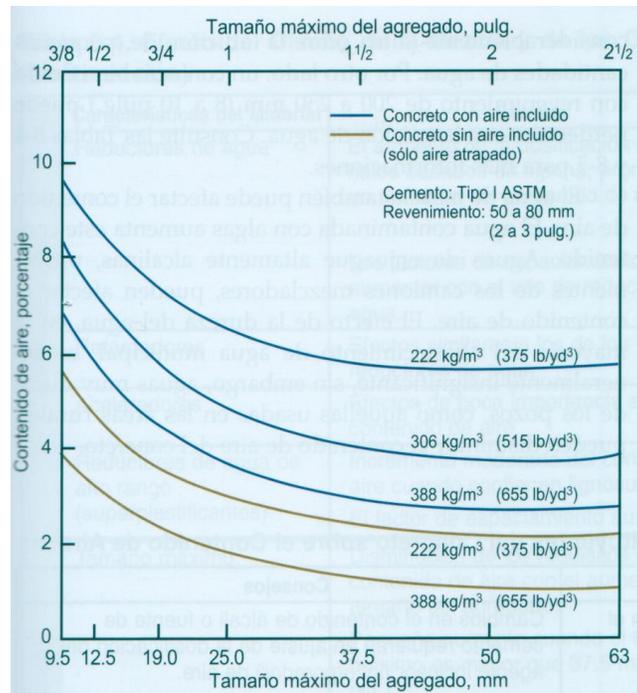


Figura 3. Relación entre el tamaño del agregado, el contenido del cemento y el contenido de aire en el concreto (PCA Major Series 336)

2.1.3. Agregado fino.

El contenido de agregado fino en la mezcla afecta el porcentaje de aire incluido (incorporado). La figura 4 muestra que la cantidad de agregado fino promueve una mayor incorporación de aire para una cantidad fija de cemento con aire incluido o de aditivo incluso de aire.

Los agregados finos de varias fuentes pueden atrapar cantidades diferentes de aire, aún cuando tienen la misma granulometría. Esto puede ocurrir por las diferencias en la forma y la textura superficial o debido a la contaminación por materiales orgánicos. Se denomina agregado fino, al agregado que sea menor a 3/8" (0.95cm).

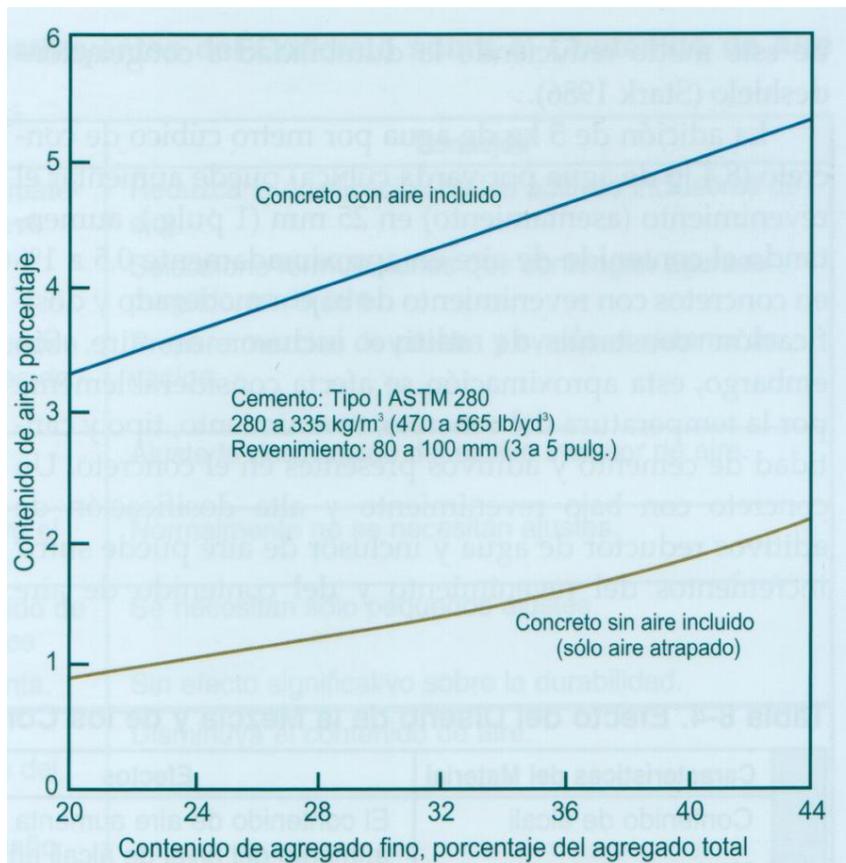


Figura 4. Relación entre el porcentaje de agregado fino y el contenido de aire en el concreto (PCA Major Series 336)

Con el objetivo de ampliar el panorama sobre los agregados que se pueden utilizar para producir concreto ligero, a continuación se expondrán algunos de ellos describiendo su origen y características. En la Figura 5 se muestra la clasificación de los agregados ligeros:

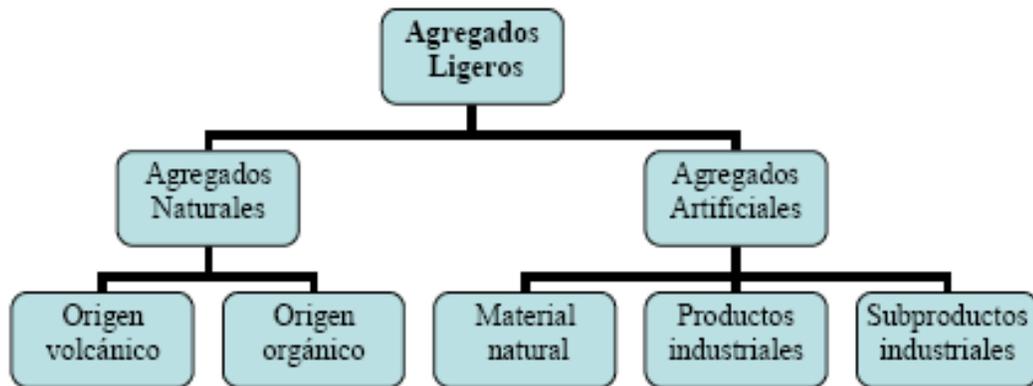


Figura 5. Clasificación de los agregados ligeros (Elizondo, 2006, p.7).

2.1.4. Agregados naturales.

a) Origen volcánico.

La lava se define como roca derretida que se halla en la superficie de la Tierra que puede contener gases y aire, y cuando se enfría, se endurece convirtiéndose en un material poroso. A este tipo de materiales se le conoce como agregados volcánicos. Entre los más utilizados se encuentra la piedra pómez (pumita) y la escoria.

- La piedra pómez. Es un vidrio volcánico espumado de color claro, su peso volumétrico se encuentra alrededor de 500 a 900 kg/m³. Ofrece la ventaja de producir un concreto con densidad de 700 a 1400 kg/m³, con buenas características aislantes sin ser demasiado débil estructuralmente, sin embargo, posee una absorción y contracción elevadas (Neville, 1992).

- La escoria. Es una roca vítrea vesicular, parecida a la ceniza industrial, produce un concreto con las características similares que el agregado anterior.

b) Origen orgánico.

Se definen de esta manera los desechos provenientes de la agricultura para la producción de materiales de la construcción. Su utilización ofrece ventajas prácticas y económicas, pues no representa un valor comercial y, en los lugares donde se desperdicia este material, el costo de transporte es mínimo. Como ejemplo de un material orgánico para la producción de concreto ligero se tiene a la cáscara de la palma de aceite.

- Cáscara de la palma de aceite. La cáscara de la palma de aceite es dura y se encuentra en desecho de manera triturada como resultado del proceso para liberar el aceite. La cáscara triturada tiene una densidad de 620 kg/m³ y una gravedad específica de 1.25. Un cubo de concreto ligero producido con este material resiste entre 51 y 199 kg/cm² (Chandra y Bemtsson, 2003).

2.1.5. Los agregados artificiales.

a) Materiales naturales.

Este tipo de agregados se producen por un proceso térmico utilizando materiales naturales como esquistos, arcillas, pizarras, perlitas, obsidianas y versiculitas, provocando su expansión.

- Pizarras, arcillas y esquistos expandidos. Estos agregados se obtienen calentando a temperaturas de 1000 a 1200 °C en hornos rotatorios. Se produce la expansión del material gracias a la generación de gases que

quedan atrapados en una masa viscosa, la cual queda retenida al enfriarse. La densidad obtenida en este tipo de agregados ligeros en el proceso de horno rotatorio es de 300 a 650 kg/m³ y permiten producir un concreto ligero entre 1400 a 1800 kg/m³ (Neville, 1992). Los concretos ligeros producidos con estos agregados, por lo general, presentan mayor resistencia que cuando se emplea cualquier otro agregado ligero.

- La perlita. Es una roca vítrea volcánica que se puede encontrar en América, Italia, Ulster y otros lugares. Al calentarse rápidamente a temperaturas entre 900 a 1000 °C se expande debido a la evolución del vapor formando un material celular con densidad de 30 a 240 kg/m³ (Neville, 1992). El concreto elaborado con este agregado ofrece una baja resistencia y alta contracción por lo que se emplea principalmente como aislante.
- La vermiculita. Es un material de forma laminada muy parecido a una mica, se encuentra en América y en África principalmente. Cuando se calienta a temperaturas de 650 a 1000 °C se expande hasta 30 veces su tamaño. Su peso volumétrico debido a esta expansión es de 60 a 130 kg/m³ (Neville, 1992). El concreto elaborado con ella es de muy baja resistencia y exhibe una contracción elevada, sin embargo, es un excelente aislante del calor.

b) Productos industriales.

En este grupo se incluyen los productos industriales que se utilizan en la fabricación de concreto independientemente del objetivo al que fueron fabricados. Por ejemplo, el vidrio y el papel.

- Vidrio. Claro ejemplo se puede observar en Noruega donde el 86% del vidrio es recolectado y reciclado. En los últimos años, un volumen creciente de vidrio reciclado se ha utilizado en la fabricación de concreto. El concreto con vidrio (Glass Concrete) contiene más del 70%

de vidrio reciclado machacado que puede reemplazar el agregado grueso utilizado en concreto tradicional. Este producto se utiliza en su mayoría para fachadas y acabados de piso (Meyer, 2002).

- Papel. Con este material se fábrica el “papercrete” ó papelcreto. El concreto se fabrica con tiras de papel, cemento y arena en proporciones de 60/20/20. La ventaja que ofrece es ser barato debido a que requiere de papel no utilizado de periódicos, revistas, tarjetas, etc. Adicionalmente el papercrete puede ser moldeado para fabricar ladrillos y bloques de diferentes tamaños (EarthWorks, 2000).

c) Subproductos industriales.

No todos los agregados ligeros se producen utilizando materia prima natural, algunos se producen como subproductos de procesos industriales tales como las cenizas volantes, escoria, desecho municipal, etc.

- Ceniza volante. Es un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en si las partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases. Existen diferentes clases de ceniza volante, las mayormente utilizadas son la clase C y clase F. La clase C se produce al crear carbones sub-bituminosos y poseen propiedades puzolánicas; la clase F es producido por la quema de antracita y poseen, por lo general, un bajo contenido de calcio. Los nódulos aglomerados (Lytag) poseen un peso volumétrico de alrededor de 1000 kg/m³ y la fracción fina puede alcanzar los 1200 kg/m³. Su utilización en la fabricación de concreto produce un concreto de 1100 a 1400 kg/m³ pero cuando se emplea arena natural para mejorar la trabajabilidad de la mezcla puede alcanzar de 1750 a 1850 kg/m³ (Neville, 1992).

Escoria expandida de alto horno. Se produce de dos maneras: por medio de chorro de agua o mediante un proceso mecánico. En el primero, una cantidad

limitada de agua en forma de rocío entra en contacto con la escoria fundida al descargarla del horno durante la producción del hierro. La generación de vapor infla la escoria que aún está en estado plástico, de manera que se endurece en forma porosa. En la segunda manera la escoria fundida se agita rápidamente con una cantidad controlada de agua. El vapor queda atrapado formándose algunos gases debido a la reacción química entre la escoria y el vapor de agua. La densidad de la escoria varía entre 300 y 1000 kg/m³, dependiendo del proceso de enfriamiento. El concreto elaborado con escoria tiene una densidad de 950 a 1750 kg/m³ (Neville, 1992).

- Humo de sílice. Es un subproducto de la producción del metal silíceo o ferrosilíceo. Se recolecta de las chimeneas de gases de los hornos de arco eléctrico. Se caracteriza por ser un polvo extremadamente fino, como 100 veces más pequeño que un grano de cemento. Generalmente se utiliza entre el 5% y el 12% de los materiales cementantes para la producción de concreto de alta resistencia o de permeabilidad reducida (NRMCA, 1998).

2.2 Clasificación de los concretos ligeros.

El concreto ligero se puede clasificar de dos maneras, dependiendo del método empleado para su fabricación y de acuerdo al uso que se le va a dar.

2.2.1 Clasificación del concreto ligero dependiendo del método de fabricación.

Existen tres métodos para producir concreto ligero: concreto sin finos, concreto con agregados de peso ligero y concreto celular, como se observa en la Figura 6.

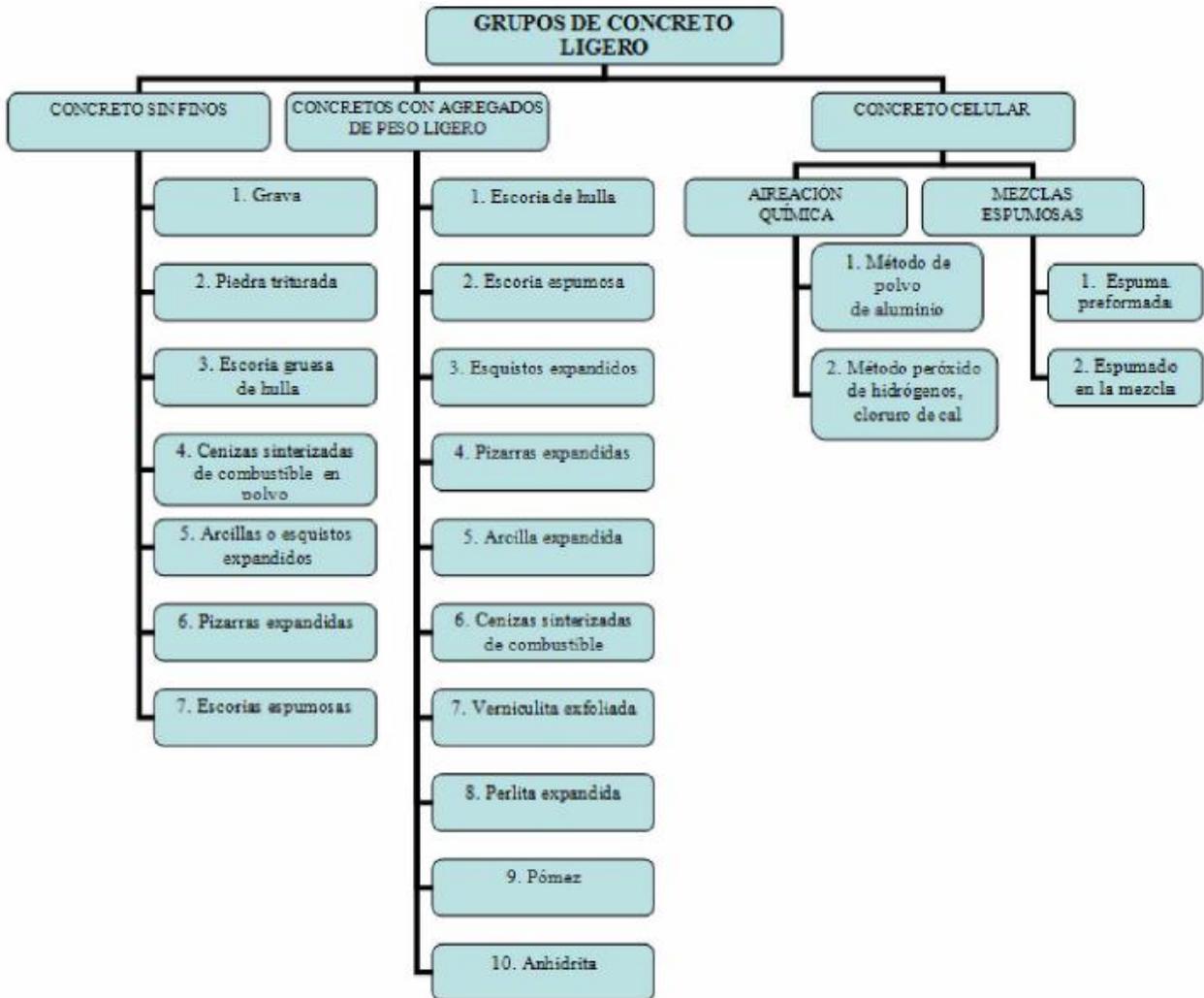


Figura 6. Métodos de fabricación de concreto ligero (Elizondo, 2006)

A continuación se explicará de manera general en qué consiste cada uno de estos métodos.

2.2.2. Concreto sin finos.

Este método consiste simplemente en omitir en la mezcla el agregado fino, de manera que queden en ella grandes cavidades intersticiales como se observa en la Figura 7. En este tipo de mezcla se emplea, por lo general, agregado grueso de peso normal pero también se puede aligerar el concreto utilizando agregado grueso de peso ligero como: escoria gruesa de hulla, arcillas o esquistos expandidos, pizarras expandidas y escorias espumosas.

2.2.3. Concreto con agregados de peso ligero.

En este proceso se emplea agregado de peso ligero poroso de baja densidad en vez de utilizar agregado de peso normal con una densidad relativa de aproximadamente 2.6 (Neville, 1992). A diferencia del 'concreto sin finos', en este método se utilizan ambos agregados, tanto grueso como fino, y tienen un peso más ligero que los agregados usuales (grava y arena).

Algunos materiales utilizados como agregados de peso ligero son: escoria de hulla, escoria espumosa, arcilla expandida, pizarras expandidas, perlita expandida, piedra pómez, piedra pumita y anhidrita, entre otros como desechos y desperdicios industriales como papel, vidrio, plásticos, etc.

Los profesores de la Universidad Hong Kong, Tommy Y. Lo y H.Z., nos mencionan que la aplicación de agregados ligeros en un concreto provocará el decremento de su peso de un 25% a un 30%, comparado con un concreto tradicional, sin disminuir su resistencia significativamente.

2.2.4. Concreto con aire incluido o celular.

Este último método consiste en producir burbujas de aire en una lechada de cemento, de tal manera que, al fraguar ésta quede con una estructura celular. Existen dos formas de producir el concreto celular: con el método químico y el método espumado.



Figura 7. Vista microscópica de las partículas de diferentes tipos de concreto ligero (Concretos Celulares, Ltda., 2004).

2.2.5. Clasificación del concreto ligero dependiendo de su aplicación.

Como se mencionó anteriormente también se puede clasificar el concreto ligero de acuerdo a su uso: para fines de aislamiento y similares, y como concreto ligero estructural.

2.2.6. Aplicación del concreto ligero como material aislante.

Los productos que se pueden emplear con el concreto ligero son innumerables. Se utiliza principalmente para muros divisorios con fines de aislamiento térmico por su baja conductividad térmica, y como protección contra el fuego, ya que ofrece una mayor resistencia al fuego que el concreto convencional. Estructuralmente se emplea en forma de bloques o elementos prefabricados curados con vapor a alta presión, pero también se ha empleado en la construcción de pisos en vez del piso hueco de mosaico.

2.2.7. Concreto ligero estructural.

De acuerdo con el ACI (American Concrete Institute) el concreto ligero estructural tiene una densidad de alrededor de 1440 a 1840 kg/m³ comparado con el concreto de peso normal con una densidad entre 2240 y 2400 kg/m³. Para que un concreto ligero tenga aplicaciones estructurales, su resistencia debe ser mayor que 175 kg/cm² (ACI, 1981). La mezcla de este tipo de concreto se fabrica a base de agregado ligero. En algunas ocasiones los materiales ligeros más utilizados en

el concreto de uso estructural y que cumplen con los requerimientos de la norma ASTM C 330 (American Society for Testing and Materials) son: pizarra, esquistos y arcilla expandidas por su estructura porosa. También se han utilizado otros productos, como por ejemplo, escoria y cenizas volantes.

La resistencia del agregado ligero utilizado varía con el tipo y origen, y no existe una correlación fiable entre la resistencia del agregado y la resistencia del concreto. Todos los agregados tienen una resistencia máxima dependiente de la cantidad de cemento utilizado. La fuerza a compresión del agregado ligero se relaciona más con el contenido de cemento que con la relación de agua – cemento. A continuación se presenta en la figura 8 la relación aproximada entre la resistencia promedio y el contenido de cemento. En ciertas ocasiones se puede incrementar la resistencia a compresión reemplazando el agregado fino ligero por agregado fino de peso normal.

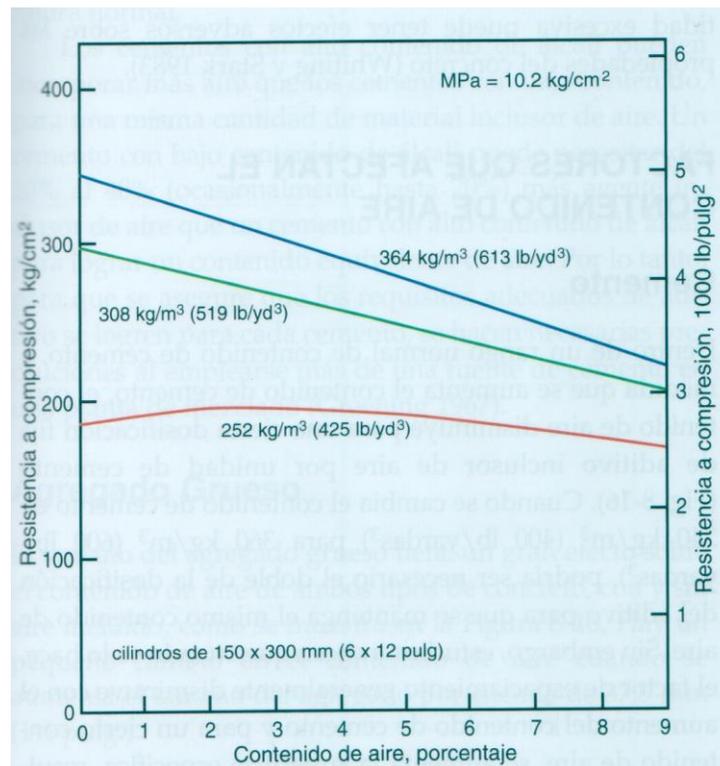


Figura 8. Relación entre el contenido de aire y la resistencia a compresión a los 28 días entre concretos con tres contenidos de cemento diferentes (Cordon, 1946)

La principal razón por la que se utiliza el concreto ligero estructural es para reducir las cargas muertas de una estructura, lo que permite al ingeniero estructurista reducir el tamaño de las columnas, zapatas y otros elementos de carga (NRMCA, 2003). La desventaja que ofrece este tipo de concreto es su alto costo comparado con el concreto normal, sin embargo, el ahorro que se pudiera llegar a tener al disminuir las secciones de concreto, acero de refuerzo y de volumen de concreto permite un ahorro en el costo total de la estructura.

The Aberdeen Group en su artículo Structural lightweight concrete nos dice que la diferencia de un tipo de concreto o mortero ligero con respecto a otro se encuentra relacionada con el tipo de agregado que se utilice, como nos lo muestra la figura 9.

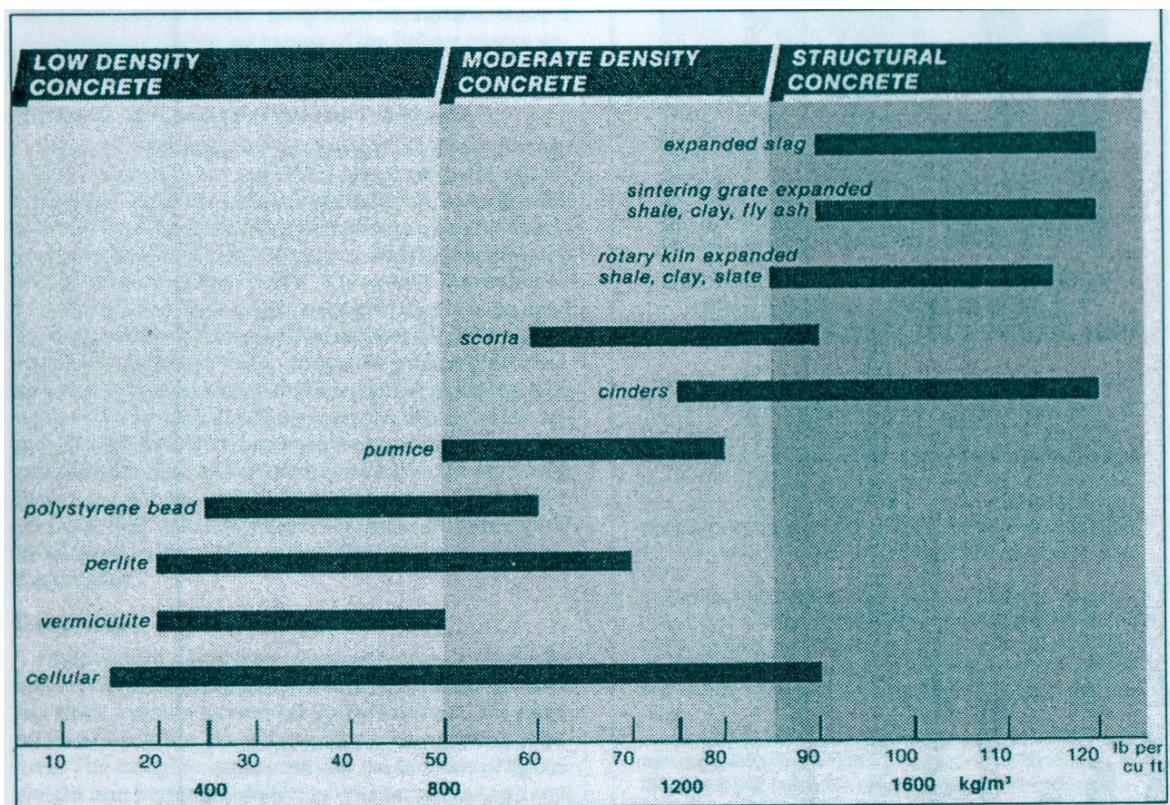


Figura 9. Tipo de concreto ligero, según el tipo de agregado.

2.3 Concreto celular.

En el texto anterior se expusieron los agregados que usualmente se utilizan en la industria de la construcción para producir un concreto ligero. Sin embargo falta enfocarse al concreto que utiliza como agregado ligero el 'aire' en lugar del agregado tradicional. Esta forma de realizar un concreto o mortero ligero es sin duda en nuestros días uno de los más utilizados por diversas empresas nacionales e internacionales.

De acuerdo con el ACI 523.4R-09, el concreto celular se define como un producto ligero a base de cemento Portland, cemento con arena sílica, cemento puzolánico, pastas de sílica y limo o pastas que contienen mezcla de estos ingredientes y tienen una estructura celular, lograda mediante químicos formadores de gas o agentes de espuma (ACI, 2009, p.2). Es un material de peso ligero que contiene aire estable o celdas de aire uniformemente distribuidas a través de la mezcla en un volumen mayor del 20%. Las celdas de aire se añaden a la mezcla como espuma estable preformada ó a través de un aditivo dentro de la mezcla (The Aberdeen Group, 1963). En la Figura 10 se observan las cavidades originadas por las burbujas de aire.



Figura 10. Cavidades del mortero celular originadas por burbujas de aire (The Aberdeen Group, 1963)

Algunas empresas suelen añadir a los concretos celulares fibras de polipropileno como nos dice la empresa BUINY (Bufete de Ingeniería de Yucatán): El uso de este elemento se hizo imprescindible en el concreto celular, ya que las deficiencias de una mezcla fluida, se ven afectadas por el secado o una deshidratación rápida, lo que ocasiona contracciones, sin embargo, estas contracciones son controladas gracias al uso de la fibra de polipropileno. De estas fibras deben usarse las del tipo de segunda generación, es decir las que forman una malla tridimensional de refuerzo con el fin de evitar los problemas de curado, por otro lado, los productos de concreto celular prefabricados son más susceptibles mientras ganan buena parte de su resistencia, por lo que al moverlos entre el tercero y sexto días son susceptibles a despiques, la fibra ayuda a controlar esos movimientos y a controlar las grietas por golpes, además se ha demostrado que el uso de la fibra aumenta la resistencia a la tensión en un 10% y a compresión en un 6%.

El concreto celular se puede clasificar en tres tipos de densidades:

- Mortero Celular. Se compone de cemento, arena, agua y espuma, teniendo una densidad entre: 350 kg/m³ y 1000 kg/m³. Este tipo de producto es especial para rellenos fluidos, protecciones térmicas y acústicas y sobre todo, en la fabricación de bloques divisorios prefabricados (Cellular Concrete LLC, 2005).
- Concreto Aligerado Celular. Está compuesto de la misma manera que el mortero celular, su densidad varía entre 1100 kg/m³ y 1400 kg/m³ (Cellular Concrete LLC, 2005). Su principal aplicación es en muros de carga, prefabricados en general y colados en sitio con fines estructurales.

- Concreto Aligerado Celular Estructural. Se fabrica con arena, agua, cemento, grava y espuma teniendo una densidad entre 1400 kg/m³ y 1800 kg/m³ (Celluar Concrete LLC, 2005). Los productos fabricados con este tipo de concreto ligero son especiales para todo tipo de estructuras de carga, así, edificios, bodegas y otras estructuras convencionales.

El concreto celular es recomendable para:

- El clima cálido, ya sea húmedo o seco, con invierno templado y verano demasiado caliente. En estos lugares debe evitarse el empleo de materiales pesados que propicien la acumulación de calor hasta un nivel que imposibilite su enfriamiento. Es por ello que los habitantes de las zonas desérticas han recurrido a lo largo del tiempo a viviendas construidas con materiales ligeros, como el celular, que evita la penetración del calor (De Ayala, 1998).
- En clima frío, deben utilizarse materiales térmicos para propiciar la acumulación de calor interior evitando su enfriamiento. El concreto aireado se encuentra entre los materiales más térmicos debido a las celdas de aire que lo conforman (De Ayala, 1998).

El concreto aireado se emplea de dos maneras:

- Precolado. Se utiliza para la elaboración de paneles para muros, losas de azotea y de entrepiso, y bloques para la construcción, los cuales se pueden producir con cualquiera de los métodos de fabricación del concreto celular.
- Colado en sitio. Para el caso que se requiera colado en elementos estructurales y rellenos, donde el curado se realiza al aire libre.

2.4. Propiedades del concreto con aire incluido.

El la figura 11 se presenta una tabla sobre los efectos que el aire produce sobre las propiedades del concreto o mortero.

Tabla 1. Efecto del aire incluido sobre las propiedades del concreto (PCA, 2004, p.162)

Propiedades	Efecto
Abrasión	Poco efecto; el aumento de la resistencia, aumenta la resistencia a abrasión
Absorción	Poco efecto
Acabado	Reducción debido al aumento de cohesión
Adherencia al acero	Disminución
Calor de hidratación	Poco efecto
Calor específico	Sin efecto
Cohesión	Aumento de la cohesión, dificultando el acabado
Conductividad térmica	Disminuye cerca del 1% al 3% para el aumento de cada punto porcentual del aire.
Demanda de agua del concreto fresco para un mismo revenimiento (asentamiento)	Disminuye con el aumento del contenido de aire aproximadamente de 3 a 6 kg/m ³ (5 a 10 lb/yd ³) por cada punto porcentual del aire.
Descascaramiento	Reducción significativa
Descascaramiento por descongelantes	Reducción significativa
Difusividad térmica	Disminuye cerca del 1.6% con el aumento de cada punto porcentual del aire.
Estanquidad	Aumenta un poco por la disminución de la relación agua/cemento
Fatiga	Poco efecto
Fluencia	Poco efecto
Masa específica	Reduce con el aumento del aire
Módulo de elasticidad (estático)	Con el aumento del aire, reduce aproximadamente de 7,300 a 14,100 kg/cm ² o 720 a 1380 MPa (105,000 a 200,000 lb/pulg ²) para cada porcentual de aire
Permeabilidad	Poco efecto, la disminución de la relación agua-cemento reduce la permeabilidad
Reactividad álcali-sílice	La expansión disminuye con el aumento del aire
Resistencia a compresión	Reduce aproximadamente del 2% al 6% para el aumento de cada punto porcentual del aire. Mezclas pobres pueden tener un aumento de la resistencia
Resistencia a congelación-deshielo	Aumento significativo de la resistencia al deterioro por congelación-deshielo en estado saturado
Resistencia a flexión	Reduce aproximadamente del 2% al 4% por el aumento de cada punto porcentual de aire
Resistencia a los sulfatos	Mejoría considerable
Retracción (secado)	Poco efecto
Revenimiento (asentamiento)	Aumenta con el incremento de aire aproximadamente 25 mm (1 pulg.) para cada ½ a 1 punto porcentual de aumento del aire.
Sangrado (exudación)	Disminuye considerablemente
Temperatura del concreto fresco	Sin efecto
Trabajabilidad	Aumenta con el aumento de aire

2.4.1. Reducción de la carga muerta.

El peso ligero del concreto celular con respecto al concreto convencional permite construir elementos estructurales más pequeños ya que la carga muerta se reduce y durante el análisis estructural disminuye el requerimiento de elementos más grandes que es lo que ocurriría para el caso del concreto convencional. Otro ejemplo práctico es en la construcción de edificios de gran altura, ya que el uso de concreto celular puede resultar más económico que el concreto convencional en casos donde el volumen requerido sea mayor que la de un elemento prefabricado o una casa habitación.

En zonas de alto riesgo sísmico es de gran importancia la utilización de concreto con bajo peso, como el concreto celular, ya que presentan menores fuerzas inerciales provocando que no ocurran daños físicos en las estructuras. Además, la remoción de escombros durante las actividades de reconstrucción y rescate después de haberse presentado el desastre es mucho más rápida. Otra ventaja de la baja densidad del concreto celular es el ahorro en el acarreo del material. La manejabilidad en transporte de elementos de concreto celular, organización y colocación de piezas de mampostería determinan el tiempo de ejecución de las obras, por lo que la reducción de estos tiempos se reflejan en el costo final de los trabajos. En la Figura 11 se muestra la facilidad de construcción de un muro utilizando bloques de concreto celular.



Figura 11. Construcción de un muro utilizando bloques de mortero celular HEBEL (HEBEL, 2009)

2.4.2. Aislamiento térmico.

Existen diferentes formas de evaluar el grado de aislamiento térmico del concreto, como por ejemplo la evaluación del coeficiente “K” de transmisión de calor, análisis de la resistencia térmica y la capacidad de reflejar luz solar que tiene una superficie (albedo). Los métodos más comunes para evaluar el aislamiento térmico en el concreto es por medio de la evaluación del coeficiente K de conductividad térmica y la resistencia térmica.

El coeficiente K en el concreto celular es relativamente alto y se hace mayor ó menor en razón inversa a la densidad del material. La razón de esta propiedad es debido a que las oquedades llenas de aire permiten se lleve a cabo la conductividad térmica de manera intermitente, pues los vacíos del concreto no se encuentran conectados entre sí.

En la Tabla 2 se presentan valores de conductividad térmica de diferentes tipos de materiales ligeros incluyendo el concreto celular. Destaca entre ellos el concreto celular ya que muestra valores del coeficiente de resistencia a la transmisión de calor altos a bajas densidades comparados a los demás materiales. Debido a sus poros de aire, el concreto celular reduce el paso de la temperatura exterior al interior de la construcción.

Tabla 2. Valores de conductividad y resistividad térmica de diferentes tipos de concreto ligero (Concretas Celulares Ltda., 2009).

TIPO DE CONCRETO	DENSIDAD [kg/m ³]	VALOR DE K [kcal/m.h.°C]	VALOR DE 1/K [m.h.°C/kcal]
Escoria de hulla (clinker)	1200	0.31	3.23
	1520	0.50	2.00
	1680	0.56	1.78
Escoria espumosa	1000	0.25	4.00
	1280	0.30	3.33
Arcilla expandida	720	0.17	5.89
	960	0.24	4.16
	1200	0.29	3.45
Cenizas sinterizadas de combustible en polvo pómez	1200	0.29	3.45
	720	0.16	6.26
	1120	0.25	4.00
	1200	0.29	3.45
Vermiculita	576	0.14	7.15
	770	0.19	5.26
Perlita	480	0.10	10.00
	800	0.19	5.26
Concreto celular	320	0.07	13.88
	480	0.09	10.75
	640	0.12	8.06
	800	0.17	5.89
	960	0.22	4.55
Concreto sin finos (con grava)	1760	0.72	1.39
	1840	0.81	1.24
Concreto sin finos (con escoria de hulla)	1280	0.40	2.50
	1440	0.48	2.07
Concreto compacto	2320	1.24	0.81
Tabique de barro cocido	1600	1.12	0.89
Material de peso ligero pero enlucido	448	0.10	10.00
	480	0.11	9.09
	640	0.16	6.25
	770	0.17	5.89
	900	0.22	4.55
Yeso compacto para enlucidos	1600	1.00	1.00

En la Tabla 3 se muestran los valores de la resistencia térmica para algunos sistemas de muro. Este valor es de gran importancia en la práctica ya que proporciona las bases para comparar los valores efectivos de aislamiento de distintos sistemas de techos y muros utilizando diferentes materiales.

Tabla 3. Valor de resistencia térmica “U” de algunos sistemas de muro (Concretos Celulares Ltda., 2009).

SISTEMA DE MURO	VALOR DE “U” [kcal/m ² .h.°C]
Muro de concreto compacto de 20 cm de espesor.	2.68
Muro de tabique macizo, de 22.5 cm de ancho enyesado en el lado interior.	2.1
Muro de tabique hueco de 28 cm de espesor enyesado en el lado interior.	1.46
Muro de concreto sin finos (con grava) de 25 cm de espesor con aplanado y enyesado.	1.66
Muro de concreto sin finos (con escoria de hulla) de 25 cm de espesor con aplanado y enyesado.	1.12
Muro de concreto celular de 15 cm de espesor (densidad de 880 kg/m ³) con aplanado exterior y enyesado interior.	0.98
Muro hueco, cara de externa de tabique de 11 cm de espesor, cara interna de concreto celular de 8 cm de espesor (densidad de 880 kg/m ³) enyesado.	1.07
Muro hueco como el anterior pero con la cara interna hecha en concreto celular (densidad de 560 kg/m ³).	0.78
Muro de bloque de concreto celular (densidad de 480 kg/m ³) de 20 cm de espesor con aplanado exterior y enyesado interior.	0.39

En la Tabla 2 se observa que el concreto celular como material utilizado en muros y losas tiene un menor valor de U en comparación con los sistemas de concreto convencional.

En la Tabla 4 se presenta la conductividad térmica del concreto celular elaborado con espuma preformada, arena y cemento de acuerdo al proveedor Cellular Concrete LLC para densidades mayores a los 1200 kg/m³.

Tabla 4. Coeficiente de conductividad térmica, “K” para densidades mayores a 1200 kg/m³ de concreto celular (Cellular Concrete LLC, 2009).

Densidad húmeda		Densidad seca		Coeficiente “K” de conductividad térmica	
lb/ft ³	kg/m ³	lb/ft ³	kg/m ³	Watt / m. °K	Kcal /h. m. °C
90	1440	85	1360	0.47	0.404
95	1520	90	1440	0.53	0.455
100	1600	95	1520	0.59	0.507
105	1680	100	1600	0.65	0.558
110	1760	105	1680	0.72	0.619
115	1840	110	1760	0.79	0.680
120	1920	115	1840	0.86	0.739
125	2000	120	1920	0.95	0.816

2.4.3. Resistencia al fuego.

El requerimiento de resistencia al fuego tiene como objetivo asegurar que, una vez iniciado un incendio en una edificación, la rapidez de extensión y dirección de propagación sean lo necesariamente limitadas para dar tiempo suficiente para que los ocupantes puedan escapar y que el equipo de bomberos pueda actuar rápidamente evitando que el fuego alcance una magnitud que ocasione daños irreparables.

La prueba consiste en aplicar a fuego directo una cara de cada espécimen hasta el momento que el lado no expuesto al calor llegue a los 250 °F (121 °C). Para la realización de la prueba se utilizaron especímenes de 3 x 3 ft (0.91 x 0.91 m) y de espesores de 2, 3 ½ y 5 pulgadas (5.08, 8.9 y 12.7 cm) elaborados de concreto celular con espuma preformada, vermiculita y perlita (*Gustafarro, Abrams y Litvin, 1970*).

Se demostró en las pruebas de laboratorio que los paneles de concreto celular pueden mantenerse a fuego directo mucho más tiempo que otros concretos ligeros dependiendo del espesor. En la Tabla 5 se muestran los resultados de una prueba

realizada a tres tipos de concreto ligero, entre ellos el concreto celular, elaborado con espuma preformada, donde se observó el tiempo máximo que resisten losas de concreto ligero a fuego directo. Se observa que el concreto celular resiste más tiempo la exposición al fuego directo que los otros dos tipos de concreto ligero con una densidad más baja que el resto de los concretos. Se hace notar que a menores densidades la resistencia al fuego del concreto celular es mayor.

Tabla 5. Resistencia al fuego de diferentes tipos de concreto ligero (Gustaferro, Abrams y Litvin, 1970).

Tipo de concreto ligero	No. Mezcla	Promedio de la densidad húmeda. [kg/m ³]	Promedio de la resistencia a compresión [kg/cm ²]	Espesor del espécimen [cm]	Edad de los ensayos [días]	Duración de la prueba [hr:min]
Concreto Celular	C-30	657	23	12.7	37	7:48
	C-58	1073	32	13	43	6:22
	C-78	1346	58	13	42	4:36
	C-100	1700	154	12.8	102	3:04
Concreto con perlita	P-29	657	14.41	12.7	79	6:37
	P-58	1025	43	12.8	70	6:24
	P-74	1300	65	13	70	5:00
Concreto con vermiculita	V-28	800	17	12.7	79	7:33
	V-54	1153	34	13.1	72	7:33
	V-70	1314	83	12.9	166	5:16
	V-79	1474	74	13.4	98	5:26

2.4.4. Absorción del agua.

Los concretos ligeros, debido a su porosidad, tienen una mayor absorción que los concretos ordinarios. Es por ello que no se exponen a la intemperie sin antes utilizar una capa protectora adecuada.

La experiencia en países Europeos, como en Suecia, demuestra que el concreto aireado se comporta de manera satisfactoria bajo la lluvia si se tiene un recubrimiento exterior simple como la pintura, excepto en condiciones severas. Si se quiere aplicar el concreto celular en condiciones extremas es conveniente utilizar un aplanado en los muros exteriores para así evitar la absorción (De Ayala, 1998).

Dado que el concreto aireado tiene una elevada absorción del agua, la velocidad de penetración de ésta a través del concreto es lenta porque los poros grandes no se llenan por succión (*Neville, 1992*). Sin embargo no es conveniente someter al concreto a exposiciones severas de humedad, pues a medida que aumente la humedad en el concreto celular, mayor será su conductividad térmica.

2.4.5. Durabilidad.

La durabilidad de un material se define como la capacidad que tiene para resistir los efectos de los agentes del medio que los rodea. Estos se pueden interpretar como los ataques químicos y los esfuerzos físicos.

El concreto celular no posee una resistencia especial a los ataques químicos como agua freática, corrosiva, ambiente contaminado y escurrimiento. Por el contrario, debido a que es más poroso que los concretos convencionales es más vulnerable. Es por ello la necesidad de utilizar un aditivo hidrófugo especial para permitir el uso del concreto celular en zona donde este expuesto. El ataque químico del aire no es significativo a excepción de que se utilice en medios corrosivos y/o contaminados. (*Concretos Celulares Ltda., 2004*).

Los esfuerzos ocasionados debido a la contracción del concreto por secado o a movimientos térmicos diferenciales entre materiales de distinta clase, o bien otros fenómenos de la naturaleza semejantes, no ocasionan agrietamiento en el concreto celular, esto debido a la cantidad de agua que posee.

Los daños mecánicos pueden resultar de la abrasión o impacto, pero pueden también provenir de una carga excesiva en miembros sujetos a condiciones de esfuerzo, sin embargo, se puede llegar a reducir utilizando agregados como fibras de propileno especiales para concreto celular. Otro aspecto importante es el uso de varillas con alto grado de corrosión, ya que ocasiona decascaramiento del concreto celular. El acero de refuerzo debe tratarse remojándolo en un líquido anticorrosivo adecuado como soluciones bituminosas y resinas epóxicas (*Neville, 1992*).

2.4.6. Aislamiento Acústico.

Debido al colchón de aire generado en el interior del material, éste nos ofrecerá una gran resistencia a los provenientes del exterior, además de ayudarnos a impedir o disminuir la trasmisión del sonido entre áreas interiores.

2.4.7. Trabajabilidad.

Gracias a la incorporación del aire incluido se puede obtener una mejor trabajabilidad en el concreto o mortero. Estos son efectivos principalmente en mezclas pobres (de bajo contenido de cemento) que de otra manera serían ásperas y difíciles de trabajar. En un estudio (Cordon, 1946), una mezcla con aire incluido producida con agregado natural, 3% de aire y revenimiento (asentamiento) de 37 mm presentó la misma trabajabilidad que un concreto sin aire incluido con 1% de aire y asentamiento de 75 mm, a pesar que menos cemento fuese necesario en la mezcla de aire incluido. La trabajabilidad de las mezclas con agregados angulares y granulometría pobre se mejora de manera similar.

Debido a la mejora de la trabajabilidad con la incorporación de aire, se puede reducir considerablemente el contenido de agua y arena como nos lo muestra la figura 12. Por ejemplo un volumen de concreto con aire incluido requiere menos agua que el mismo volumen de concreto sin aire incluido, con la misma consistencia y mismo tamaño máximo del agregado.

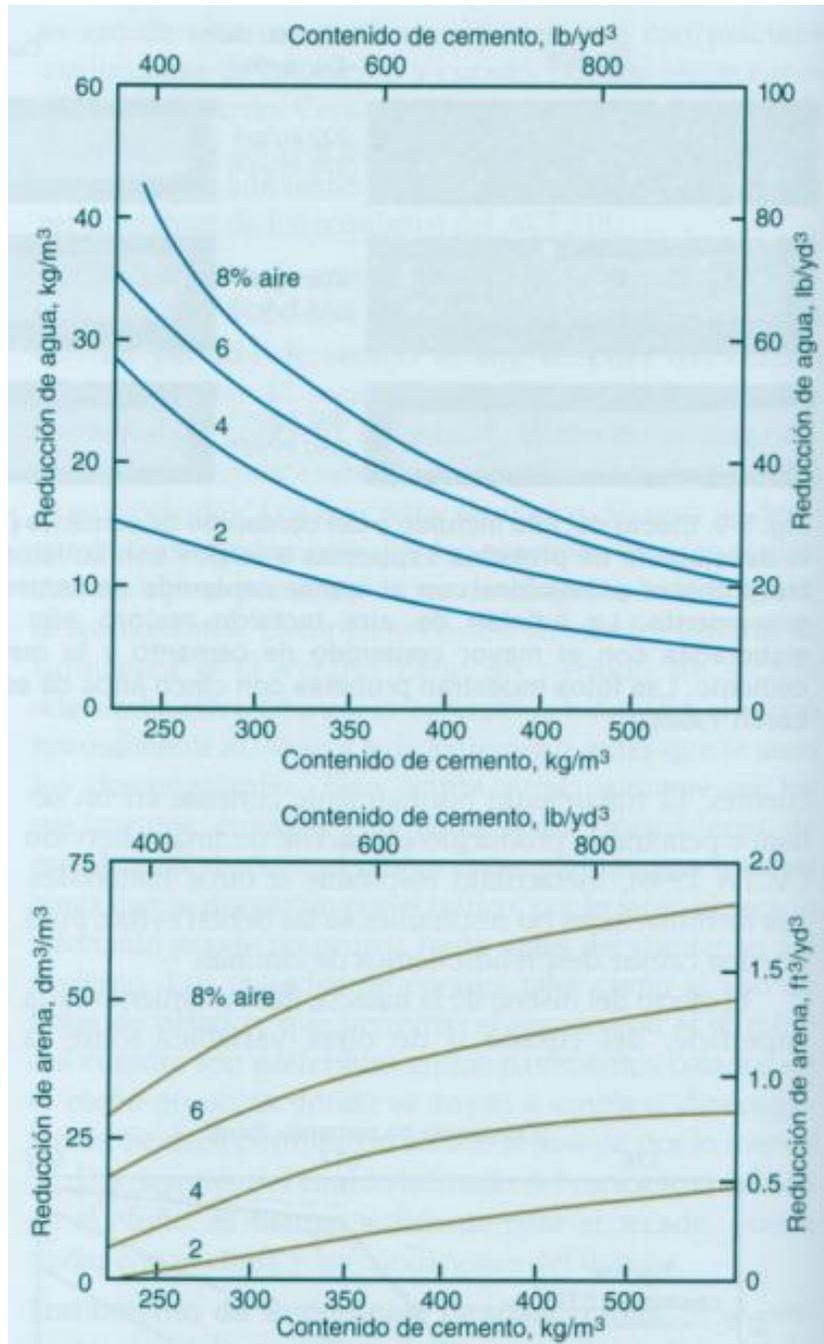


Figura 12. Relación entre el contenido de agua y el contenido de arena obtenidos de varios niveles de contenidos de aire y cemento (Gilkey, 1985).

2.4.8. Manejabilidad.

El concreto espumado es ideal para colarse en sitio, ya que resulta fácil añadir la espuma en la mezcla. Los agregados seleccionados se colocan en la mezcladora de la misma manera que se hace con el concreto normal, pero con la diferencia de que se sustituye cierto porcentaje de agregado por celdas de aire que se ingresan por medio de espuma preformada.

La cantidad de espuma que se debe de añadir depende del tipo de uso que se le quiera dar al concreto y el volumen deseado.

El concreto celular espumado, especialmente sin agregado grueso, es bombeable y fácilmente trabajable, como se muestra en la Figura 12, por lo que facilita la elaboración de prefabricados como paneles de losa para entepiso y azoteas entre otras instalaciones donde la presión del concreto en estado húmedo es relativamente baja. En la Figura 14 se muestra como se observa una mezcla antes de añadirle la espuma y como se muestra después, se observa el efecto fluidificante de la espuma en la mezcla. Su alta fluidez permite, también, la elaboración de piezas ornamentales, bloques y paneles prefabricados como se ve en la Figura 13.



Figura 13. Colocación de piezas de mortero celular (HEBEL, 2009).

Además, el concreto celular producido con espuma preformada no necesita de cámaras de autoclave, sólo requiere de un cuarto húmedo o simplemente que los elementos se curen al aire libre, teniendo cuidado de no exponer los especímenes a el calor ó frío extremo.

2.4.9. Resistencias a la compresión.

La resistencia a compresión del concreto celular se puede ver afectada por factores como el peso volumétrico, contenido de cemento, relación de agua – cemento, propiedades de los agregados y el curado. Cada proveedor de aditivo y equipo para producir espuma proporcionan tablas de referencia para dosificar concretos con una variedad de densidades y resistencias utilizando sólo la arena y cemento. En la tabla 6 se presentan las dosificaciones realizadas por Cellular Concrete LLC utilizando la combinación de agregado y cemento.

Tabla 6. Densidades y resistencias del concreto celular elaborado con espuma preformada (Cellular Concrete LLC, 2009).

Densidad húmeda		Densidad seca		Resistencia (28 días)					
lb/ft ³	kg/m ³	lb/ft ³	kg/m ³	lb/in ²			kg/cm ²		
90	1441.661	85	1361.569	400	-	500	28.12278	-	35.15348
95	1521.754	90	1441.661	750	-	1000	52.73022	-	70.30696
100	1601.846	95	1521.754	1000	-	1500	70.30696	-	105.4604
105	1681.938	100	1601.846	1500	-	2000	105.4604	-	140.6139
110	1762.031	105	1681.938	2000	-	2500	140.6139	-	175.7674
115	1842.123	110	1762.031	2500	-	3000	175.7674	-	210.9209
120	1922.215	115	1842.123	3000	-	3500	210.9209	-	246.0744
125	2002.308	120	1922.215	3500	-	4000	246.0744	-	281.2278

Cuando el contenido de aire se mantiene constante, la resistencia del concreto o mortero varía inversamente con el aumento de la relación agua-cemento. En la figura 14 se muestra una relación típica entre la resistencia a compresión a los 28 días y la relación agua-cemento para un concreto que tiene el contenido de aire adecuado. A medida que el contenido de aire aumenta,

normalmente se puede conservar la misma resistencia, si se mantiene constante la relación vacíos (aire + agua) – cemento, pero esto puede requerir un aumento del contenido del cemento (PCA, 2004, p. 168)

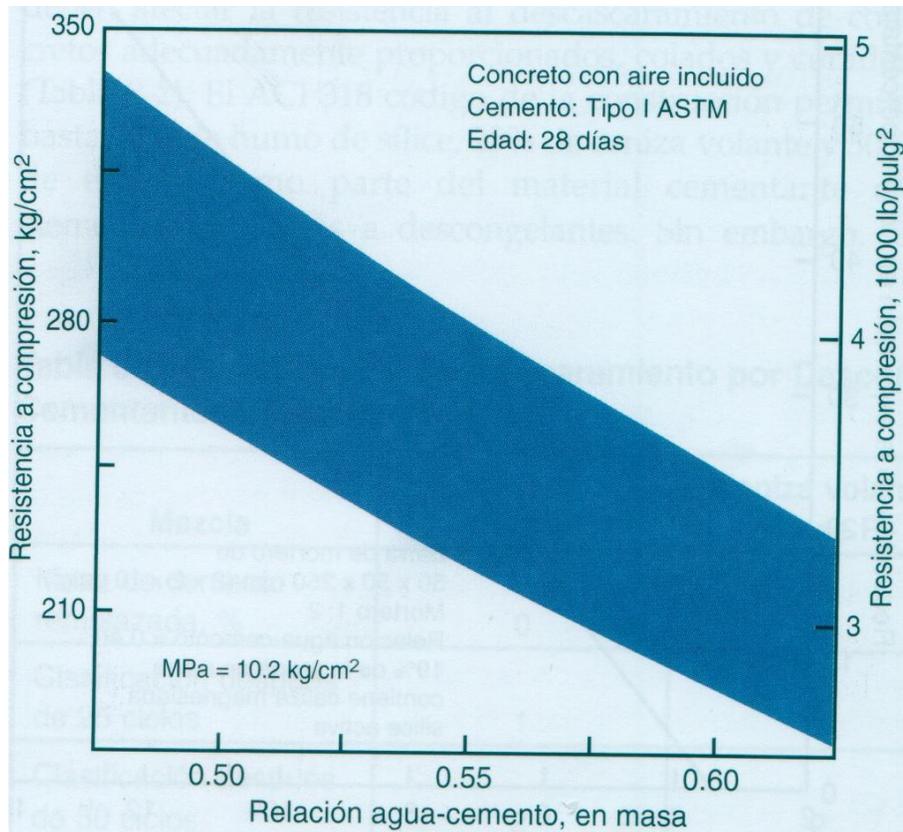


Figura 14. Relación entre resistencia a compresión a los 28 días y la relación agua-cemento.

Por otro lado, los concretos y morteros con aire incluido pueden tener menor relación agua-cemento que los concretos sin aire incluido, que minimiza los efectos de la reducción de la resistencia que generalmente acompañan la incorporación de aire. En la figura 15 nos muestra que con una relación agua-cemento constante, el aumento de aire va a reducir la resistencia proporcionalmente.

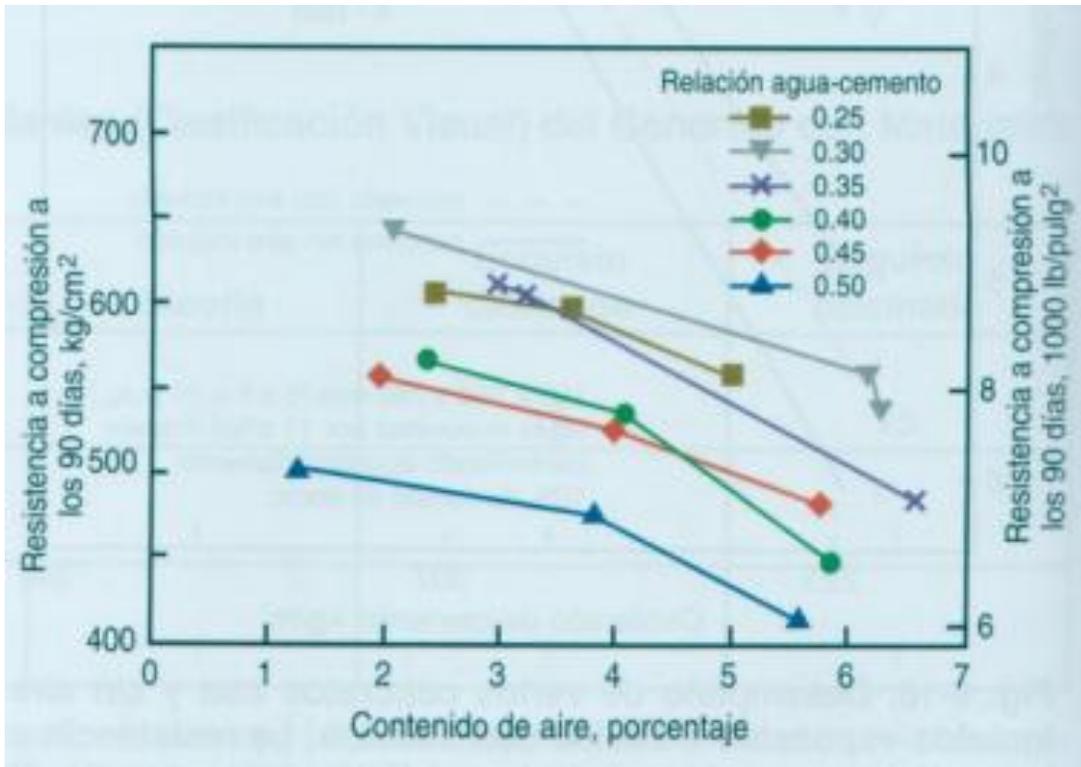


Figura 15. Relación entre la resistencia a compresión a los 90 días y el contenido de aire (Pinto y Hover, 2001).

En el trabajo de Pinto y Hover (2001) un concreto con 45 de contenido de aire tuvo una disminución de la resistencia de 100 kg/cm². Para poder mantener una resistencia constante, si este concreto se tuvo que bajar 0.14 la relación agua-cemento.

2.4.10. Densidad.

Como se puede observar la resistencia a compresión aumenta a medida que la densidad del concreto aumenta, sin embargo, es posible aumentar las resistencias y reducir el peso del concreto si se utiliza un curado de autoclave. Dependiendo de sus densidades y resistencias es la aplicación que se le puede dar al concreto espumado. En la Tabla 7 se exponen los diferentes tipos de aplicaciones en la industria de la construcción de acuerdo a la densidad.

Tabla 7. Aplicaciones del concreto celular con espuma preformada dependiendo de la densidad (Concretos Celulares Ltda., 2009).

Densidad promedio [kg/m ³]	Aplicaciones
350 – 600	Para entrepisos y entre techos como aislante térmico y acústico.
800 – 1000	Para prefabricados no portantes, bloques y aislamientos térmicos.
1100 – 1200	Prefabricados portantes y para pisos.
1400 – 1600	Usos estructurales, moldes en sitio y premoldeados.
1800	Apto para todo tipo de usos estructurales.

2.5. Comparación entre el concreto celular elaborado con espuma preformada con respecto a otros tipos de concreto celular.

El método químico realizado en planta requiere de una mezcladora convencional y solamente se añaden los materiales involucrados, arena, cemento, agua y, entre ellos, el polvo de aluminio. Este método es un sistema industrializado y sirve para trabajar con grandes volúmenes de productos, adicionalmente, requiere de mano de obra calificada para su elaboración. El método de espuma preformada requiere de un generador de espuma preformada, aditivo y agregados convencionales para la fabricación del concreto celular, además el equipo es portátil permitiendo realizar colados en sitio.

La razón por la que los concretos celulares elaborados por los procesos químicos utilizan como medio de curado el secado a alta presión ó en autoclave se debe a que necesita una adecuada generación de la tobermorita. La hidratación del cemento consiste esencialmente en la formación de silicatos de calcio hidratados que se agrupan y forman el gel de tobermorita considerado como responsable de las propiedades esenciales de la pasta de cemento endurecida. Si no se curara en autoclave no se formaría correctamente el gel de tobermorita, el cual, se refleja en agrietamientos y mala calidad del producto. Los métodos espumados no forman grandes proporciones de tobermorita, por lo que, no

requerirían autoclaves, sin embargo, se pueden introducir los productos de espuma en cámaras de autoclave con la finalidad de aumentar su resistencia, sin embargo, impactaría en el costo final (Neville, 1992).

A diferencia del sistema químico, en el que el volumen crece a medida que la mezcla reacciona con el aditivo, (por ejemplo, polvo de aluminio), con el sistema de espuma preformada el incremento del volumen al adicionar la espuma es instantáneo, luego de colar o fundir los elementos con el mortero o concreto.

Los productos elaborados con el proceso químico presentan una mayor resistencia a menores densidades con respecto al elaborado con espuma debido al curado en autoclave, sin embargo este proceso de curado resulta costoso. La resistencia a la compresión entre de los productos químicos es mayor que los productos espumados, por ejemplo, para lograr una resistencia de 70 kg/cm² el método químico y curado en autoclave requiere una densidad de 600 kg/m³, mientras que el método de espuma requiere de 1100 kg/m³, pues éste último requiere de más arena para lograr la resistencia (Concretos Celulares, Ltda., 2004).

Con respecto al sistema espumado producido por reacción en la mezcla, tiene la desventaja de requerir un control eficiente de la velocidad de mezclado y la cantidad de aditivo que se le añade a la mezcla para poder obtener los pesos y resistencias estimadas. El concreto con espuma preformada no requiere de un control tan estricto, con sólo realizar bien el mezclado de los materiales cementantes y procurar mezclar los materiales y la espuma lo suficiente sólo para que las celdas de aire no se pierdan.

Los productos que se pueden fabricar con los diferentes tipos de concreto celular son innumerables, desde bloques, muros completos, vigas, cimentaciones, rellenos de pisos, etc.

El sistema de espuma preformada tiene la ventaja de que el equipo puede trasladar y por ello el concreto celular se puede colar en cualquier sitio y de cualquier forma, mientras que el concreto con el método químico está destinado a la inversión de moldes especiales para su ingreso en las autoclaves. Las piezas producidas con el método químico a base de polvo de aluminio ofrecen mejor calidad que los productos a base de espuma preformada. Esto no quiere decir que no se puedan fabricar productos de buena calidad con espuma, si se tiene cuidado en la selección de los agregados y las temperaturas de curado se pueden obtener productos de calidades similares (*De Ayala, 1998*).

2.6. Aplicaciones en la construcción de prefabricados para viviendas.

La problemática de la vivienda en México se ha agudizado debido a diversos factores como la sobrepoblación, la complejidad en trámites administrativos, procesos tecnológicos deficientes, falta de acceso a créditos inmobiliarios, el azote de fenómenos naturales a la entidad, entre otros. Dentro de estos factores destaca el problema de los fenómenos naturales, que durante los últimos años, ha provocado severos daños a las comunidades Mexicanas, ocasionando que cientos de familias se queden sin hogar (*Yeomans y Reynoso, 1999*).

Estos factores nos llevan a pensar en la posibilidad de utilizar sistemas alternativos de construcción a los tradicionales, que permitan producir viviendas de manera rápida y eficiente procurando respetar las necesidades de confort y espacio. Estos sistemas involucran procesos materiales alternativos de construcción. Uno de estos materiales alternos es el concreto celular elaborado con espuma preformada que ofrece propiedades térmicas y resistencia necesaria para la elaboración de casas habitación. Los motivos para utilizar el concreto celular elaborado con espuma son:

- Aprovechar las características térmicas del concreto celular.
- Estudiar la posibilidad de emplearlo como prefabricado, dada la facilidad de elaboración, bajo peso y manejabilidad del concreto.
- Analizar la posibilidad de emplearlo como material que facilite la construcción monolítica de viviendas de diferente geometría.
- Propiciar que las familias puedan ampliar su vivienda con facilidad.
- Bajar el costo de construcción y ahorrar el consumo de energía.

2.7. Dosificaciones

El tipo de dosificación puede variar notablemente según el tipo de agregados que se encuentren en la zona o que se vayan a utilizar, pero en un caso típico y sin agregar cales, yesos u otros cementantes pondríamos como dosificaciones básicas lo que nos muestra la figura 16.

DOSIFICACIONES BÁSICAS INICIALES PARA PRODUCIR UN METRO CÚBICO DE CONCRETO CELULAR.

Para densidad 1600 kg/m³:		Para densidad 1400 kg/m³:	
cemento:	300 kg.	cemento:	250 kg.
arena:	1200 kg.	arena:	1050 kg.
agua:	120 kg.	agua:	110 kg.
espuma:	450 lts.	espuma:	520 lts.
fibra polipropileno:	1 kg.	fibra polipropileno:	1 kg.
Para densidad 1200 kg/m³:		Para densidad 1000 kg/m³:	
cemento:	240 kg.	cemento:	225 kg.
arena:	870 kg.	arena:	680 kg.
agua:	100 kg.	agua:	95 kg.
espuma:	620 lts.	espuma:	685 lts.
fibra polipropileno:	1 kg.	fibra polipropileno:	1 kg.
Para densidad 700 kg/m³:		Para densidad 500 kg/m³:	
cemento:	210 kg.	cemento:	200 kg.
arena:	400 kg.	arena:	215 kg.
agua:	90 kg.	agua:	85 kg.
espuma:	900 lts.	espuma:	1250 lts.
fibra polipropileno:	1 kg.	fibra polipropileno:	1 kg.

El **aditivo espumante** rinde/proporciona un promedio de 560 litros de espuma por litro de aditivo.

Figura 16. Dosificaciones básicas iniciales para producir un metro cúbico de concreto celular

En algunos casos cuando se localiza un buen cementante o una arena rica en sílice o de características particulares podremos reducir el consumo de cemento hasta un 30%, controlando la resistencia de los productos.

2.8. Comparación entre concreto o mortero normal y uno ligero.

En la parte física podemos decir que el concreto o mortero ligero:

- Puede llegar a ser 4 veces más aislante del sonido (insonoro) que el concreto o mortero convencional.
- El concreto o mortero ligero puede llegar a ser 6 veces más aislante térmico que el concreto normal.
- El concreto o mortero ligero tiene una vejez igual al concreto normal.
- El concreto o mortero ligero llega a fundir a 1100°C, el concreto normal desde: 600°C.
- El concreto o mortero ligero es igual de resistente a los sulfatos que el concreto normal.
- El concreto o mortero ligero puede llegar a pesar hasta la quinta parte de un concreto convencional.

- Un obrero rinde más colocando unidades grandes de concreto o mortero ligero que colocando unidades pequeñas fabricadas con concretos normales.
- Un obrero utiliza menor mortero de pega colocando unidades de concreto o mortero ligero que cualquier otro sistema.

La reducción de carga muerta es considerable, en un edificio de 5 pisos cada piso con un área de 200m², se ha demostrado que la cimentación podría reducirse en un 25% representando esto en un ahorro total de la construcción hasta de un 35%.

Tratándose de un concepto "nuevo" de aplicaciones y mezclas de concretos o morteros NO TRADICIONALES; deberá considerarse que en la producción de un m³ deberá tenerse en cuenta el importantísimo factor de densidad por Kg/m³; de masa al final de la mezcla. Las miles de burbujas incluidas, no solamente expanden la mezcla si no que también cambia las densidades radicalmente. La aplicación de las diferentes densidades del concreto o mortero ligero; es un espacio reservado a la ingeniería, la imaginación; y; las pruebas en campo. (BUINY, 2009)

2.9. Empresas fabricantes de morteros y concretos ligeros.

2.9.1. HEBEL.

Es una empresa que fabrica un sistema integral de construcción compuesto por blocks para la construcción de muros y paneles para losas de entrepiso y azoteas. Hebel fabrica los productos de su sistema constructivo a base de concreto celular.

Schierhorn, Carolyn en su artículo "Is the U.S. ready for celular concrete block?" nos dice que esta empresa opera 11 plantas de concreto aireado en Alemania, además de contar con 40 plantas alrededor del mundo produciendo más de 6.5 millones de piezas de concreto aireado anualmente.

Esta empresa ofrece ventajas en su producto, aislamiento térmico, trabajabilidad, resistencia al fuego, economía y facilidad.

2.9.2. CELDACRET.

Es un sistema constructivo con tecnología 100% mexicana con base en los sistemas y productos tradicionales de la construcción, pero con innovaciones tecnológicas que se traducen en seguridad, confianza, eficiencia y menores costos, producto esto último de la rapidez en la edificación, celdacret más que un producto, es todo un sistema de construcción con características integrales que anticipa un promisorio futuro en la industria de la construcción moderna (CELDACRET, 2009).

CELDACRET es un concreto, también llamado concreto ligero, concreto molecular o concreto celular, su principal propiedad es su baja densidad provocada por el uso de la roca pumítica como agregado y el aditivo ADICRET.

El concreto ligero "CELDACRET" se usa en la fabricación de muros prefabricados, colados de pisos o firmes de concreto, entrepisos y techos.

A continuación se presentan algunas de las ventajas que este sistema CELDACRET ofrece:

CELDACRET es 45% más ligero que el peso de diseño del concreto normal, ya que la porosidad de la roca pumítica así como la acción del ADICRET le permiten disminuir el peso de los elementos del sistema CELDACRET.

➤ Termicidad

Los millones de moléculas contenidas en la estructura del concreto celular retardan la temperatura de la atmósfera exterior (el calor se trasmite por conducción, siendo seis veces más lenta en celdacret en comparación con el concreto normal), creando un clima interior confortable y equilibrado, lo cual se refleja en la disminución del acondicionamiento ambiental por lo que disminuye en el consumo de energía eléctrica (25% aproximadamente). En el uso de aire acondicionado o calefacción).

➤ Impermeabilidad

La fluidez y el aire incluido contenido en la estructura del concreto, detiene la humedad, tanto de la atmósfera como de los fenómenos naturales.

➤ Acústica

Celdacret ofrece una gran resistencia a los ruidos exteriores y a la transmisión del sonido en áreas interiores.

➤ Cimentación

El sistema Celdacret usa una dala perimetral de confinamiento reforzada con acero que permite el anclaje del acero en sus diferentes formas y requerimientos.

➤ Tiempo de Fraguado

El aditivo adicret provoca un acelerador para el fraguado del concreto, lo cual permite descimbrar los elementos estructurales tales como:

Muros colados en sitio: 18 horas.

Losas de entrepiso y azotea: 36 horas con carga; 24 horas sin carga.

➤ Costos

Acero: este es uno de los insumos que más afecta al precio de los elementos estructurales, ya que su función principal es la de soportar los esfuerzos de tensión provocado por las cargas y el peso propio de concreto, al disminuir la carga muerta por el peso propio de concreto (1,350 kg/m³), disminuyen las cargas soportadas por la estructura y la cimentación y en consecuencia el costo de la misma.

Agregados pétreos: el costo de estos insumos se basa principalmente en el peso de los materiales y cómo afecta en su acarreo; éstos al ser reemplazados con arena pumítica, que es un 45% más ligera que el basalto o el granito, impacta en costo de los acarreos y en el costo final de la obra.

Cimbra: entre los diferentes sistemas de Cimbra (cimbramex o multicimbra) permiten de 300 a 2000 usos. Lo que provoca un considerable ahorro en costos.

Acabados: al contar con una superficie casi lisa, el costo de los acabados disminuye en un 60%, pues sólo se requiere del uso de una tapa poro para pintar sobre esta superficie. Permite un texturizado de 2 a 3mm.

Limpieza: al eliminar el uso de diversos materiales en obra, los desperdicios disminuyen casi en su totalidad, por lo que la mano de obra ocupada en este concepto es casi nula.

Existen otras empresas como CEMEX y CONCRESA, que surten concreto y mortero ligero para su colado en sitio ya sea tirado premezclado o bombeado, de igual manera que un concreto tradicional.

III. Experimentación

En este capítulo realizaremos pruebas de laboratorio para obtener las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes especímenes que serán probados, teniendo en cuenta su edad y la carga a la que serán sometidos. Para ello se tendrá que realizar la caracterización de nuestro mortero base y de cada una de las dosificaciones que se realicen, y así al final de todos nuestros resultados, podremos elegir entre las mezclas realizadas, las mejores para realizar un mortero de baja densidad y poderlo utilizar en la industria de la construcción.

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 la ASTM, utilizando en cada una de las pruebas, el equipo manual y mecánico que se encuentra estandarizado dentro de dicho reglamento.

3.1 Metodología experimental

La etapa experimental se llevó a cabo en tres fases: a) trabajos previos a la experimentación, b) etapa general, c) etapa final.

3.1.1 Trabajos previos a la experimentación

En esta etapa de investigación se realizaron pruebas con poliestireno en forma de esfera con diferentes diámetros, esto para observar y comparar las reacciones al tener una diámetro mayor y uno menor. Los diámetros que se utilizaron son los que nos marcan las normas, para agregado chico no mayor a

3/8" (0.95cm) y el agregado grueso que se ubica entre 3/8" (0.95cm) y 2 1/2" (6.3cm). Posteriormente se realizaron las mismas pruebas pero con poliestireno reciclado, teniendo de igual manera una granulometría mayor y una menor.

Los trabajos previos a la experimentación cumplieron con dos objetivos, uno: el de evaluar la trabajabilidad del poliestireno reciclado utilizando dos tipos de diámetros; grande y pequeño. El segundo objetivo fue el de establecer una comparación de resultados entre un número reducido de mezclas con la misma pasta pero con diferentes diámetros.

En esta etapa los especímenes se fabricaron en moldes de 5x5x5 cm, como lo marca las normas de la ASTM para los morteros.

3.1.2 Etapa general

Del análisis de los resultados de los trabajos previos se limitó la experimentación general a 81 muestras divididas en 3 mezclas o conjuntos de trabajo. Cada conjunto está compuesto por mezclas con características similares en cuanto a: proporción cemento y cantidad de agua, porcentajes de poliestireno reciclado, además del procedimiento de preparación de la muestra. Variando el tiempo de curado en 7, 14 y 28 días.

En esta etapa los especímenes se fabricaron en moldes de 5x5x5 cm, como lo marca las normas de la ASTM para los morteros.

3.1.3 Etapa final

En esta etapa se analizaron los resultados de las pruebas de la etapa general, para poder realizar bloques de mampostería con la pasta con mejores resultados y así poder realizar diferentes pruebas: 1. Peso específico, 2. Resistencia a la flexión, 3. Resistencia a la compresión, 4. Absorción en 24 horas, 5. Tasa inicial de absorción, 6. Conductividad térmica, 7. Reacción al fuego.

En esta etapa los especímenes se fabricaron en moldes de 5x15x25 cm.

3.2 Materiales

Los materiales utilizados en cada una de las mezclas fueron:

Mezcla base, etapa preliminar:

Cemento Portland (marca APASCO)

Agua limpia.

Mezcla 1, etapa preliminar:

Poliestireno (esfera) diámetro 0.612 cm

Cemento Portland (marca APASCO)

Agua limpia.

Mezcla 2, etapa preliminar:

Poliestireno (esfera) diámetro 2.062 cm

Cemento Portland (Marca APASCO).

Agua limpia.

Mezcla 3, etapa general y final:

Poliestireno reciclado diámetro aprox. 0.6cm. Gracias a los resultados de la etapa preliminar se pudo concluir que el diámetro óptimo del poliestireno para utilizar en la siguiente etapa debe de estar en un rango cercano a 0.6cm.

Cemento Portland (marca APASCO).

Agua limpia.

3.3 Equipo

3.3.1. Equipo Manual

Para la realización de las diferentes mezclas se contó con el siguiente equipo manual de laboratorio.

- 9 Moldes cúbicos de 5 cm. por lado, estandarizados en las normas ASTM.
- Gaveta para bloques de mampostería de 5 x 15 x 25 cm
- Charola para la realización del mezclado.
- Cucharas y espátulas para la realización del mezclado.
- Cucharón.
- Varilla punta de bala, para el compactado.
- Engrasador de moldes.
- Probeta 100 ml.
- Cuarto de curado

3.3.2. Equipo Mecánico

Para la realización de las diferentes mezclas se contó con el siguiente equipo mecánico de laboratorio.

- Máquina Universal Tinius Olsen.
- Báscula digital, precisión: décimo de gramo.
- Báscula mecánica, precisión: ± 1 g
- Cámara digital CANON.

3.4 Desarrollo de mezclas

El procedimiento de mezclado para la fabricación de los especímenes fue realizado de la misma manera, ya que se trató de tener las mismas condiciones, tanto de equipo, como manuales en cada una de las pruebas.

Un punto muy importante de mencionar es la relación agua/cemento, ya que esta se ve modificada cuando se agrega el poliestireno, es decir, existe una pequeña pérdida de agua por la absorción que el poliestireno genera.

3.4.1 Etapa preliminar y general

El procedimiento para la realización de nuestras mezclas es el siguiente:

Primero tenemos que preparar y tener listo, nuestros materiales y equipo que utilizaremos, así como tener limpios y engrasados nuestros moldes. Posteriormente se procederá a pesar cada uno de los materiales. Se colocará el cemento en la charola de mezclado y posteriormente se colocará la cantidad de agua previamente medida y se procederá a mezclar hasta obtener una pasta homogénea. A esta pasta se le agregará el poliestireno y se mezclará, hasta obtener una mezcla uniforme.

Después de terminar el mezclado, se procederá a colar los moldes ya engrasados, con el llenado tradicional para los especímenes cúbicos, es decir, dos capas y entre cada una de ellas se hace el compactado con la varilla de bala con 25 golpes. Al terminar el llenado de cada uno de nuestros especímenes, se realizará el enrase de cada molde para obtener una superficie pareja.

Las mezclas se dejarán fraguar y posteriormente se descimbrarán para proceder con el curado, llevando nuestros especímenes al cuarto de curado. El proceso de curado es por inmersión total en agua, y se dejarán ahí hasta el momento de someterlos a prueba, ya sea a los 7, 14 ó 28 días.

Los especímenes se sacarán y se dejarán secar, para proceder a pesarlos. Posteriormente se llevarán a la maquina universal donde se realizará la prueba de compresión, sometiendo nuestros especímenes a una fuerza de compresión totalmente sobre la sección que se va a probar. En este proceso es muy importante que la superficie de nuestros cubos sea pareja, si no es así se tendrá que cabecear o utilizar arena sílica.

Esta técnica esta basada en la norma: ASTM C109 / C109M - 08 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).

No hay que olvidar que al final de realizar las mezclas, así como las pruebas, se procederá a lavar y limpiar el equipo utilizado, y dejarlo en condiciones óptimas, para usarlo en las siguientes muestras.

3.4.1.1 Desarrollo mezcla base

Primer paso: prueba de fluidez

La relación agua/cemento se obtendrá a través de la prueba de fluidez para las mezclas bajo la norma: ASTM C143/C143M-03 Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete.

$A/C=r$

(1)

Donde:

A=agua (g);

C=cemento (g)

r=relación agua/cemento

% f= porcentaje de fluidez (%)



Figura 17. Cono y mesa de fluidez (foto tomada en la UAQ)

La prueba de fluidez determina la cantidad de agua que se va a agregar a la mezcla

Segundo paso: pesado de los materiales

Pesar la cantidad de cemento.



Figura 18. Báscula mecánica, utilizada para pesar el cemento (foto tomada en la UAQ)

Medir la cantidad de agua.



Figura 19. Probeta 100 ml. utilizada para medir el agua (foto tomada en la UAQ)

Tercer paso: engrasado de moldes



Figura 20. Moldes cúbicos de 5 cm por lado engrasados (foto tomada en la UAQ)

Cuarto paso: mezclado de los materiales

Se tendrá la charola limpia para el mezclado.



Figura 21. Charola para mezclado (foto tomada en la UAQ)

Se vaciará la cantidad previamente pesada de cemento.



Figura 22. Charola con el cemento (foto tomada en la UAQ)

Se vaciará la cantidad previamente medida de agua limpia.



Figura 23. Charola con el cemento y agua (foto tomada en la UAQ)

Se mezclarán el cemento y el agua, hasta obtener una pasta homogénea.



Figura 24. Mesclado del cemento y el agua (foto tomada en la UAQ)

Se vaciará la primer parte de la pasta en cada uno de los moldes y se compactará con la varilla punta de bala dando 25 golpes.



Figura 25. Vaciado de la pasta, primera parte (foto tomada en la UAQ)

Se vaciará la segunda parte de la pasta en cada uno de los moldes y se compactará con la varilla punta de bala dando 25 golpes, al final se enrasará, para obtener una superficie pareja.



Figura 26. Vaciado de la pasta, segunda parte (foto tomada en la UAQ)

Quinto paso: descimbrado y curado

Al fraguar nuestra mezclas se procederá a descimbrar nuestros moldes y los especímenes serán llevados al cuarto de curado, para ser curados por inmersión total en agua, a diferentes edades, 7,14 ó 28 días.

Descimbrado de los moldes.



Figura 27. Descimbrado de moldes (foto tomada en la UAQ)

Curado de especímenes por inmersión total en agua.



Figura 28. Curado de especímenes (foto tomada en la UAQ)

Sexto paso: pesar especímenes

Al terminar el tiempo de fraguado se procederá a pesar los especímenes.

Pesar cada uno de las muestras



Figura 29. Bascula digital (foto tomada en la UAQ)

Séptimo paso: prueba compresión

Se realizará la prueba a compresión como lo marcan las normas ASTM para morteros.

Prueba a compresión en Máquina Universal Tinius Olsen



Figura 30. Máquina Universal Tinius Olsen (foto tomada en la UAQ)

3.4.1.2 Desarrollo de mezclas con diferentes proporciones

Se realizarán los pasos de la mezcla base, agregando un procedimiento en el segundo paso y en el cuarto paso. En el segundo paso, además de pesar el cemento y medir el agua, también se pesará la cantidad de poliestireno que se va a utilizar y en el cuarto paso se mezclará el poliestireno después de tener la pasta de agua y cemento, hasta obtener una mezcla homogénea.

En el segundo paso se pesará la cantidad de poliestireno requerido para las diferentes proporciones que se realizan.



Figura 31. Bascula digital (foto tomada en la UAQ)

En el cuarto paso se agregará el poliestireno a la pasta de cemento y agua, y se mezclará hasta obtener una mezcla homogénea.

Se agregará poliestireno a la pasta de agua y cemento.



Figura 32. Poliestireno agregado a la pasta (foto tomada en la UAQ)

Se mezclará el poliestireneo y la pasta de cemento y agua, hasta obtener una mezcla homogénea.

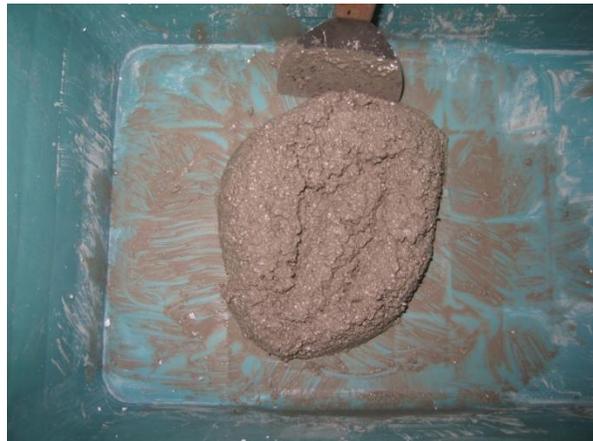


Figura 33. Mezcla de las pasta con el poliestireneo (foto tomada en la UAQ)

3.4.2 Etapa Final

Como ya mencionamos anteriormente en esta etapa elegimos la mezcla más óptima de la etapa general, para realizar los bloques de mampostería.

Al igual que en las otras etapas lo primero tenemos que preparar y tener listo, nuestros materiales y equipo que utilizaremos, así como tener limpios y engrasados nuestros moldes. Posteriormente se procederá a pesar cada uno de los materiales. Se colocará el cemento en la charola de mezclado y posteriormente se colocará la cantidad de agua previamente medida y se procederá a mezclar hasta obtener una pasta homogénea. A esta pasta se le agregará el poliestireneo y se mezclará, hasta obtener una mezcla uniforme.

Después de terminar el mezclado, se procederá a colar los moldes ya engrasados, se realizará el llenado como si fueran especímenes cúbicos, es decir, dos capas y entre cada una de ellas se hace el compactado con la varilla de bala con 25 golpes. Al terminar el llenado de cada uno de nuestros especímenes, se realizará el enrase de cada molde para obtener una superficie pareja.

Las mezclas se dejarán fraguar y posteriormente se descimbrarán para proceder con el curado, llevando nuestros especímenes al cuarto de curado. El

proceso de curado es por inmersión total en agua, y se dejarán ahí hasta el momento de someterlos a prueba, ya sea a los 7, 14 ó 28 días.

Los especímenes se sacarán y se dejarán secar, para proceder a pesarlos. Posteriormente se llevarán a la máquina universal donde se realizará la prueba de 1. Densidad aparato 2. Resistencia a la flexión, 3. Resistencia a la compresión, 4. Absorción en 24 horas, 5. Tasa inicial de absorción, 6. Conductividad térmica, 8. Reacción al fuego.

No hay que olvidar que al final de realizar las mezclas, así como las pruebas, se procederá a lavar y limpiar el equipo utilizado, y dejarlo en condiciones óptimas, para usarlo en las siguientes muestras.

3.4.2.1 Desarrollo de la mezcla

En esta parte utilizaremos la dosificación de la mezcla 1 de la etapa general que fue la que tuvo mejores características. Se realizará la mezcla para llenar moldes más grandes, manteniendo las mismas características de la mezcla 1.

Primer paso: pesado de los materiales

Pesar la cantidad de cemento.



Figura 34. Báscula mecánica, utilizada para pesar el cemento (foto tomada en la UAQ)

Pesar la cantidad de poliestireno.



Figura 35. Báscula digital, utilizada para pesar el poliestireno (foto tomada en la UAQ)

Medir la cantidad de agua.



Figura 36. Probeta 100 ml. utilizada para medir el agua (foto tomada en la UAQ)

Segundo paso: engrasado de moldes



Figura 37. Moldes cúbicos de 5 cm por lado engrasados (foto tomada en la UAQ)

Tercer paso: mezclado de los materiales

Se tendrá la charola limpia para el mezclado.



Figura 38. Charola para mezclado (foto tomada en la UAQ)

Se vaciará la cantidad previamente pesada de cemento.



Figura 39. Charola con el cemento (foto tomada en la UAQ)

Se vaciará la cantidad previamente medida de agua limpia.



Figura 40. Charola con el cemento y agua (foto tomada en la UAQ)

Se mezclarán el cemento y el agua, hasta obtener una pasta homogénea.



Figura 41. Mesclado del cemento y el agua (foto tomada en la UAQ)

Se agregará poliestireno a la pasta de agua y cemento.



Figura 42. Poliestireno agregado a la pasta (foto tomada en la UAQ)

Se mezclará el poliestireneo y la pasta de cemento y agua, hasta obtener una mezcla homogénea.



Figura 43. Mezcla de las pasta con el poliestireno (foto tomada en la UAQ)

Se vaciará la primer parte de la pasta en cada uno de los moldes y se compactará con la varilla punta de bala dando 25 golpes.



Figura 44. Vaciado de la pasta, primera parte (foto tomada en la UAQ)

Se vaciará la segunda parte de la pasta en cada uno de los moldes y se compactará con la varilla punta de bala dando 25 golpes, al final se enrasará, para obtener una superficie pareja.



Figura 45. Vaciado de la pasta, segunda parte (foto tomada en la UAQ)

Cuarto paso: descimbrado y curado

Al fraguar nuestras mezclas se procederá a descimbrar nuestros moldes y los especímenes serán llevados al cuarto de curado, para ser curados por inmersión total en agua, a diferentes edades, 7,14 ó 28 días.

Descimbrado de los moldes.



Figura 46. Descimbrado de moldes (foto tomada en la UAQ)

Curado de especímenes por inmersión total en agua.



Figura 47. Curado de especímenes (foto tomada en la UAQ)

Quinto paso: Realización de las diferentes pruebas.

3.5 Pruebas

Se realizó la prueba del módulo de ruptura y de compresión como lo marcan las normas ASTM para bloques de mampostería, así como: densidad aparente, absorción en 24 horas, tasa inicial de absorción, conductividad térmica.

3.5.1 Prueba para obtener la resistencia a la flexión para bloques de mampostería (ASTM C293-02)

Esta prueba consiste en un ensayo normalizado para determinar el esfuerzo de utilizando un bloque de mampostería simple con carga en el punto medio.

Con esta prueba el bloque se ve sometido tanto a compresión como a tensión. La capacidad a la flexión del mortero se representa por el módulo de ruptura que presenta una medida a la tensión del material.

La carga aplicada en esta prueba se localiza en el punto medio de la longitud del claro. Para realizar esta prueba se utilizaron bloques rectangulares de 5 cm x 15 cm de sección transversal y de 25 cm de largo con edades de 7, 14 y 28 días.

De acuerdo a la norma ASTM C293-02 los apoyos estarán ubicados a 1 pulgada (2.54 cm) de los extremos del bloque.



Figura 48. Prueba resistencia a flexión (foto tomada en la UAQ)

3.5.2 Prueba para obtener la resistencia a la compresión para bloques de mampostería (ASTM C1314-03)

Esta prueba a compresión es uno de los parámetros más importantes para la caracterización de los materiales. Este parámetro refleja en cierta medida la durabilidad y la resistencia al agrietamiento, es por ello que es la prueba más común de todas las pruebas de bloques de mampostería.



Figura 49. Prueba resistencia a compresión (foto tomada en la UAQ)

3.5.3 Prueba para obtener la absorción inicial y el coeficiente de saturación.

Esta prueba es una de las más importantes que se realizan a piezas de mampostería, ya que tiene un efecto significativo al momento de realizar un muro de mampostería y por ende existe una reacción en las características de la mampostería.

La capacidad de absorción de una pieza de mampostería se mide por dos parámetros: la absorción total y la tasa inicial de absorción. La absorción total representa la cantidad de agua requerida para saturar a la pieza de mampostería, mientras que la tasa inicial de absorción, es la masa de agua absorbida por unidad de área y tiempo.

3.5.3.1 Prueba de absorción en 24 horas

La prueba de absorción consiste en determinar la cantidad de agua absorbida por el espécimen en 24 hrs. Del peso de la inmersión total de la pieza, según se especifica en la norma NOM-000-SCFI-1994, restando el peso inicial seco, se obtiene el peso del agua absorbida cuyo porcentaje se da en función del peso seco; limitado entre el 9% y el 20%.

$$\text{absorción} = \frac{W_{24h} - W_s}{W_s} \times 100 \geq 9\% \leq 20\%$$

Donde;

W_{24h} = Peso de agua absorbida después de 24 horas de inmersión en agua fría

W_s = Peso Seco de la Pieza

3.5.3.2 Prueba para obtener el coeficiente de saturación

Con este ensayo se puede conocer el coeficiente de saturación de una pieza de mampostería, propiedad con la cual se observa si la pieza puede formar una buena unión con el mortero.

$$CS = \frac{C}{B} = \frac{W_{24h} - W_s}{W_{5h} - W_s} \leq 1.0$$

Donde;

CS = Coeficiente de saturación

C = Peso de agua absorbida después de 24 horas de inmersión en agua fría

B = Peso de Agua Absorbida después de 5 horas de inmersión en agua hirviendo.

3.5.3.3 Prueba para obtener la tasa inicial de absorción

El intercambio de agua determina en gran parte la adherencia mortero, parámetro fundamental en la resistencia final de la mampostería, especialmente en tensión y cortante.

$$Ta = \frac{(P_s - P_h)}{A} \times (193.5 \frac{cm^2}{min})$$

Donde;

Ta = Tasa de absorción inicial corregida con base en 193.5 cm² (gr/min).

Ps = Peso seco de la muestra (gr).

Ph = Peso humedecido después de la inmersión (gr).

A = Área de la carga del ladrillo que va a quedar en contacto con el agua.

3.5.4 Prueba para obtener el coeficiente de conductividad térmica

El coeficiente de conductividad térmica es una característica de cada sustancia y expresa la magnitud de su capacidad de conducir el calor. Su símbolo es la letra griega λ .

La Conductividad térmica se determina, al colocar una muestra o pieza de 30 X 30 cm, con un espesor máximo de 9cm, entre dos placas paralelas, una caliente y otra fría, hasta que se establece un flujo de calor estacionario y así poder determinar esta propiedad.

El aparato para realizar esta prueba consiste en dos placas de aluminio de media pulgada de espesor, y entre ellas está ubicada una resistencia alimentada por una fuente de energía, asegurando una superficie isotérmica que estará en contacto con el espécimen.

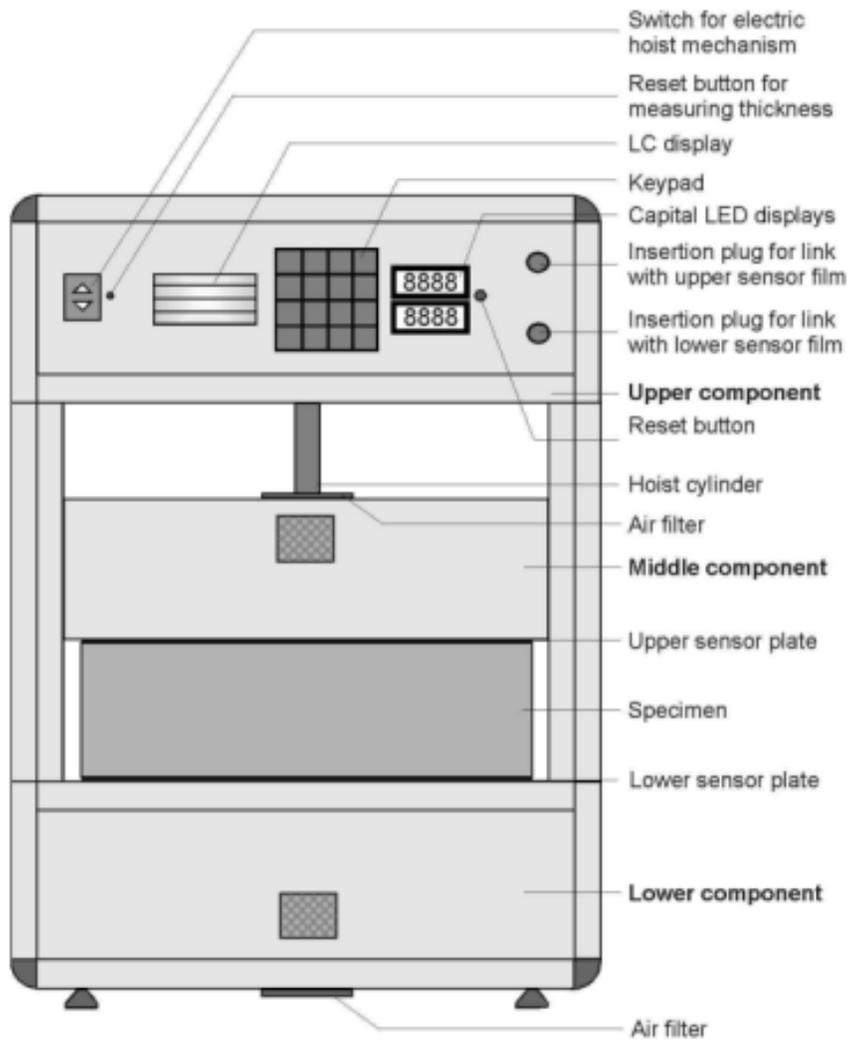


Figura 50. Prueba conductividad térmica.

3.5.5. Reacción al fuego

El poliesireno expandido tiene solamente un 1.5 al 2.5 % de su volumen, de materia eventualmente combustible, y su aporte a la carga de fuego en caso de incendio, es de 145 a 240 kcal/dm³, frente a los 2400 kcal/dm³ que aportaría la madera (10 veces mayor). De ahí se desprende que el aporte energético a un incendio de las cantidades de Poliestireno Expandido EPS que usualmente se puede emplear en el aislamiento térmico de una vivienda, está por debajo del que realizaría tan solo una pequeña parte del mobiliario.

El alcance y la tasa de liberación de calor están limitados fundamentalmente por la ventilación. Es importante señalar que el aire contenido en la estructura celular del poliestireno expandido no posee suficiente oxígeno para la combustión, siquiera incompleta del material, ya que para ella la necesidad de aire es de 130 veces mayor, en volumen, que el que ocupa el material.

Por ejemplo, una capa de 200 mm de espesor de EPS con una densidad de 20 kg/m³ representa la misma cantidad de energía que una capa de 17 mm de espesor de madera de pino.

Los elementos constructivos elaborados con poliestireno expandido muestran un excelente comportamiento en caso de incendio, siendo muy aptos, incluso para muros cortafuegos. Ello se debe a que en caso de un incendio prolongado en un lado del muro, con desarrollo de altas temperaturas, las perlitas de poliestireno expandidas incluidas en el concreto, cercanas al paramento caliente, se resumen, tomando el concreto las características de un concreto alveolar, de muy buenas propiedades de aislamiento térmico a altas temperaturas. Mientras que en la sección más alejada del lado caliente, donde las temperaturas no alcanzan para sintetizar o licuefacer el poliestireno expandido, éste mantiene sus propiedades aislantes, con lo que el concreto de poliestireno expandido conserva sus valores de conductividad térmica aproximadamente originales.

El humo es un factor importante en un incendio. Una alta densidad de humo dificultará la búsqueda de una salida de emergencia incrementando de ese modo el riesgo de los ocupantes. Sin embargo el poliestireno expandido genera una cantidad pequeña de humo debido a la baja densidad del poliestireno. En realidad, la mayoría del humo originado en un incendio proviene de materiales como la madera, fieltros asfálticos y mobiliario. Normalmente el poliestireno se encuentra protegido del fuego por materiales que lo rodean y sólo se verá afectado por el fuego cuando todo el edificio esté envuelto en llamas. En estos casos, el EPS se contraerá debido al calor, pero no arderá y no contribuye a la propagación del fuego y la cantidad de humo será limitada. La producción de humo será consecuentemente pequeña.

Los gases y humos despididos durante la combustión del son menos tóxicos que los despididos en la combustión de materiales “naturales”, como la madera, lana y corcho, y que en la mayoría de los plásticos.

Se realizarán pruebas sometiendo el material a temperaturas altas, así como la reacción al fuego con un recubrimiento y la reacción al fuego de manera directa.

3.5.6. Porosidad.

La principal característica de un material aislante es su porosidad, es decir, los espacios vacíos que hay en su estructura interna. El coeficiente de porosidad se determina por:

$$V_a - V_r = e, \text{ donde}$$

V_a , es el volumen aparente.

V_r , el volumen real.

e los espacios vacíos.

La porosidad es la propiedad que tienen los cuerpos de dejarse atravesar por aire, agua, calor, sonido y hasta por los microorganismos.

IV. DOSIFICACIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.

4.1 Dosificaciones morteros, etapa preliminar.

Se realizó la misma proporción para los diferentes especímenes en las diferentes pruebas, cambiando simplemente el tiempo de curado en 7, 14 ó 28 días.

4.1.1 Dosificaciones prueba base, etapa preliminar.

Tabla 8. Dosificación prueba base

PROPORCIÓN	CANTIDAD	PARA 9 CUBOS	
Cemento	2 kg		
Agua	.9 lt		

4.1.1.1 Resultados prueba base, etapa preliminar.

Tabla 9. Resultados y propiedades de pruebas base a 7 días de curado por inmersión total.

CUBO	LADOS	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD	AREA	COMPRESION	F´C
SOLIDO	CM	CM3	GR	GR/CM3	CM2	KG	KG/CM2
1 7 Días	5	125	247.92	1.98336	25	9108.40	364.336
2 7 Días	5	125	245.84	1.96672	25	8127.05	325.082
3 7 Días	5	125	243.72	1.94976	25	8963.80	358.552
4 7 Días	5	125	247.57	1.98056	25	7103.50	284.140
5 7 Días	5	125	244.28	1.95424	25	11861	474.440
6 7 Días	5	125	244.44	1.95552	25	7706.10	308.244
7 7 Días	5	125	247.19	1.97752	25	12437	497.480
8 7 Días	5	125	244.82	1.95856	25	8291.80	331.672
9 7 Días	5	125	244.33	1.95464	25	9409.60	376.384

Tabla 10. Resultados y propiedades de pruebas base a 14 días de curado por inmersión total.

CUBO	LADOS	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD	ÁREA	COMPRESIÓN	F´C
SÓLIDO	CM	CM3	GR	GR/CM3	CM2	KG	KG/CM2
1 14 Días	5	125	249.28	1.99424	25	9459	378.36
2 14 Días	5	125	248.66	1.98928	25	12052	482.08
3 14 Días	5	125	247.30	1.9784	25	14225	569
4 14 Días	5	125	248.57	1.98856	25	14945	597.80
5 14 Días	5	125	250.80	2.0064	25	12726	509.04
6 14 Días	5	125	245.52	1.96416	25	12867	514.68
7 14 Días	5	125	247.17	1.97736	25	12338	493.52
8 14 Días	5	125	249.79	1.99832	25	12526	501.04
9 14 Días	5	125	254.27	2.03416	25	9261	370.44

Tabla 11. Resultados y propiedades de pruebas base a 28 días de curado por inmersión total.

CUBO	LADOS	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD	ÁREA	COMPRESIÓN	F´C
SÓLIDO	CM	CM3	GR	GR/CM3	CM2	KG	KG/CM2
1 28 Días	5	125	246.39	1.97112	25	7159.5	286.380
2 28 Días	5	125	240.34	1.92272	25	9757.7	390.308
3 28 Días	5	125	240.05	1.92040	25	11439	457.560
4 28 Días	5	125	239.32	1.91456	25	8124.6	324.984
5 28 Días	5	125	237.35	1.89880	25	11196	447.840
6 28 Días	5	125	242.19	1.93752	25	6027.9	241.116
7 28 Días	5	125	241.02	1.92816	25	9625.7	385.028
8 28 Días	5	125	238.53	1.90824	25	8825.9	353.036
9 28 Días	5	125	241.56	1.93248	25	9396.9	375.876

Gráfica de resistencia a compresión para las pruebas base en diferentes edades de curado

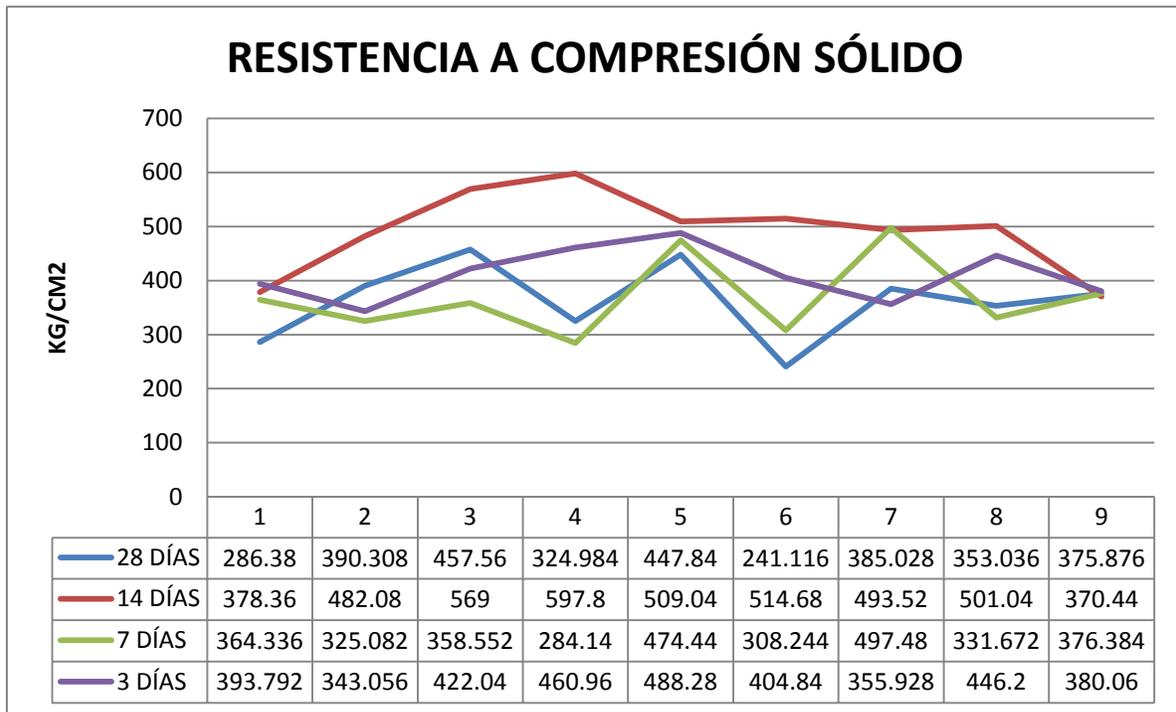


Figura 51. Gráfica de resultados a compresión

4.1.2 Primera dosificación con poliestireno reciclado, etapa general.

Tabla 12. Primera dosificación con poliestireno reciclado

PROPORCIÓN	CANTIDAD	PARA 9 CUBOS
Cemento	.8 kg	
Agua	.36 lt	
Poliestireno reciclado	0.015 kg	

4.1.2.1 Resultados primera dosificación con poliestireno reciclado, etapa general.

Tabla 13. Resultados y propiedades de la primera dosificación a 7 días de curado por inmersión total.

CUBO	LADOS	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD	ÁREA	COMPRESIÓN	F´C
	CM	CM3	GR	GR/CM3	CM2	KG	KG/CM2
1 7 Días	5	125	121.15	0.9692	25	591.66	23.6664
2 7 Días	5	125	124.48	0.99584	25	771.71	30.8684
3 7 Días	5	125	122.73	0.98184	25	734.38	29.3752
4 7 Días	5	125	124.77	0.99816	25	684.43	27.3772
5 7 Días	5	125	123.61	0.98888	25	750.42	30.0168
6 7 Días	5	125	124.93	0.99944	25	731.88	29.2752
7 7 Días	5	125	123.63	0.98904	25	544.52	21.7808
8 7 Días	5	125	128.06	1.02448	25	966.63	38.6652
9 7 Días	5	125	130.9	1.0472	25	942.73	37.7092

Tabla 14. Resultados y propiedades de la primera dosificación a 14 días de curado por inmersión total.

CUBO	LADOS	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD	ÁREA	COMPRESIÓN	F´C
	CM	CM3	GR	GR/CM3	CM2	KG	KG/CM2
1 14 Días	5	125	131.26	1.05008	25	774.27	30.9708
2 14 Días	5	125	130.04	1.04032	25	712.97	28.5188
3 14 Días	5	125	121.77	0.97416	25	647.32	25.8928
4 14 Días	5	125	131.43	1.05144	25	574.4	22.976
5 14 Días	5	125	134.83	1.07864	25	896.31	35.8524
6 14 Días	5	125	132.19	1.05752	25	858.99	34.3596
7 14 Días	5	125	132.71	1.06168	25	1084.2	43.368
8 14 Días	5	125	131.86	1.05488	25	644.6	25.784
9 14 Días	5	125	130.8	1.0464	25	1053.9	42.156

Tabla 15. Resultados y propiedades de la primera dosificación a 28 días de curado por inmersión total.

CUBO	LADOS	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD	ÁREA	COMPRESIÓN	F´C
	CM	CM3	GR	GR/CM3	CM2	KG	KG/CM2
1 28 Días	5	125	135.6	1.0848	25	1349.8	53.992
2 28 Días	5	125	131.54	1.05232	25	1107.1	44.284
3 28 Días	5	125	132.46	1.05968	25	858.5	34.34
4 28 Días	5	125	129.3	1.0344	25	695.9	27.836
5 28 Días	5	125	133.65	1.0692	25	1027.1	41.084
6 28 Días	5	125	141.66	1.13328	25	968.52	38.7408
7 28 Días	5	125	138.41	1.10728	25	1291.5	51.66
8 28 Días	5	125	137.56	1.10048	25	1053.6	42.144
9 28 Días	5	125	137.48	1.09984	25	1000.8	40.032

Gráfica de resistencia a compresión para la primera dosificación con poliestireno reciclado en diferentes edades de curado

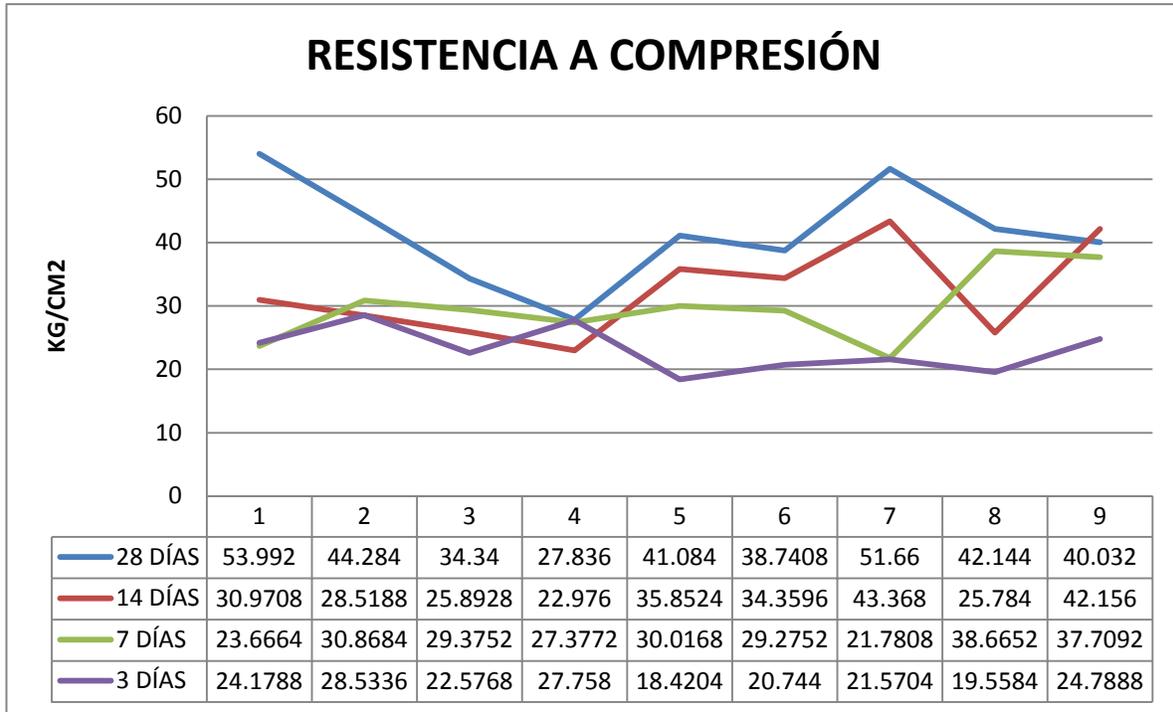


Figura 52. Gráfica de resultados a compresión con poliestireno reciclado

4.1.3 Segunda dosificación con poliestireno reciclado, etapa general.

Tabla 16. Segunda dosificación con poliestireno reciclado

PROPORCIÓN	CANTIDAD	PARA 9 CUBOS
Cemento	.7 kg	
Agua	.31 lt	
Poliestireno reciclado	0.015 kg	

4.1.3.1 Resultados segunda dosificación con poliestireno reciclado, etapa general.

Tabla 17. Resultados y propiedades de la segunda dosificación a 7 días de curado por inmersión total.

CUBO	LADOS	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD	ÁREA	COMPRESIÓN	F´C
	CM	CM3	GR	GR/CM3	CM2	KG	KG/CM2
1 7 Días	5	125	102.31	0.81848	25	310	12.4
2 7 Días	5	125	106.01	0.84808	25	252	10.08
3 7 Días	5	125	96.11	0.76888	25	282	11.28
4 7 Días	5	125	101.96	0.81568	25	302	12.08
5 7 Días	5	125	103.71	0.82968	25	268	10.72
6 7 Días	5	125	97.49	0.77992	25	284	11.36
7 7 Días	5	125	101.4	0.8112	25	250	10
8 7 Días	5	125	963.2	7.7056	25	263	10.52
9 7 Días	5	125	102.26	0.81808	25	274	10.96

Tabla 18. Resultados y propiedades de la segunda dosificación a 14 días de curado por inmersión total.

CUBO	LADOS	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD	ÁREA	COMPRESIÓN	F´C
	CM	CM3	GR	GR/CM3	CM2	KG	KG/CM2
1 14 Días	5	125	106.75	0.854	25	415	16.6
2 14 Días	5	125	102.57	0.82056	25	421	16.84
3 14 Días	5	125	106.15	0.8492	25	370	14.8
4 14 Días	5	125	103.12	0.82496	25	334	13.36
5 14 Días	5	125	106.36	0.85088	25	352	14.08
6 14 Días	5	125	104.98	0.83984	25	357	14.28
7 14 Días	5	125	103.35	0.8268	25	356	14.24
8 14 Días	5	125	100.45	0.8036	25	342	13.68
9 14 Días	5	125	106.8	0.8544	25	372	14.88

Tabla 19. Resultados y propiedades de la segunda dosificación a 28 días de curado por inmersión total.

CUBO	LADOS	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD	ÁREA	COMPRESIÓN	F´C
	CM	CM3	GR	GR/CM3	CM2	KG	KG/CM2
1 28 Días	5	125	106.92	0.85536	25	525	21
2 28 Días	5	125	103.44	0.82752	25	420	16.80
3 28 Días	5	125	106.04	0.84832	25	386	15.44
4 28 Días	5	125	110.98	0.88784	25	440	17.60
5 28 Días	5	125	110.87	0.88696	25	374	14.96
6 28 Días	5	125	110.47	0.88376	25	420	16.80
7 28 Días	5	125	105.65	0.84520	25	300	12
8 28 Días	5	125	107.59	0.86072	25	534	21.36
9 28 Días	5	125	112.85	0.90280	25	400	16

Gráfica de resistencia a compresión para la segunda dosificación con poliestireno reciclado en diferentes edades de curado

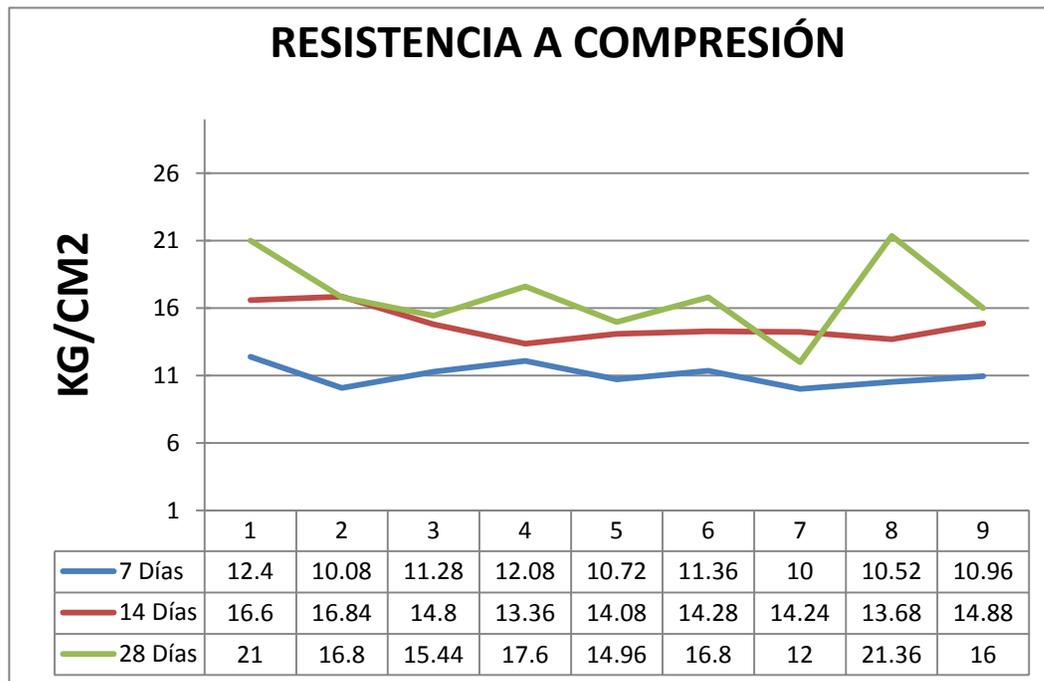


Figura 53. Gráfica de resultados a compresión con poliestireno reciclado

4.1.4 Tercera dosificación con poliestireno reciclado, etapa general.

Tabla 20. Tercera dosificación con poliestireno reciclado

PROPORCIÓN	CANTIDAD	PARA 9 CUBOS
Cemento	.6 kg	
Agua	.27 lt	
Poliestireno reciclado	0.015 kg	

4.1.4.1 Resultados tercera dosificación con poliestireno reciclado, etapa general.

Tabla 21. Resultados y propiedades de la tercera dosificación a 7 días de curado por inmersión total.

CUBO	LADOS	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD	ÁREA	COMPRESIÓN	F´C
	CM	CM3	GR	GR/CM3	CM2	KG	KG/CM2
1 7 Días	5	125	93.32	0.74656	25	216	8.64
2 7 Días	5	125	92.30	0.73840	25	192	7.68
3 7 Días	5	125	96.40	0.77120	25	206	8.24
4 7 Días	5	125	94.32	0.75456	25	228	9.12
5 7 Días	5	125	93.26	0.74608	25	232	9.28
6 7 Días	5	125	96.34	0.77072	25	198	7.92
7 7 Días	5	125	92.12	0.73696	25	222	8.88
8 7 Días	5	125	93.56	0.74848	25	195	7.80
9 7 Días	5	125	94.27	0.75416	25	215	8.60

Tabla 22. Resultados y propiedades de la tercera dosificación a 14 días de curado por inmersión total.

CUBO	LADOS	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD	ÁREA	COMPRESIÓN	F´C
	CM	CM3	GR	GR/CM3	CM2	KG	KG/CM2
1 14 Días	5	125	82.16	0.65728	25	295	11.80
2 14 Días	5	125	85.80	0.6864	25	266	10.64
3 14 Días	5	125	97.68	0.78144	25	400	16.00
4 14 Días	5	125	96.81	0.77448	25	318	12.72
5 14 Días	5	125	95.12	0.76096	25	300	12.00
6 14 Días	5	125	93.62	0.74896	25	275	11.00
7 14 Días	5	125	95.18	0.76144	25	272	10.88
8 14 Días	5	125	93.64	0.74912	25	243	9.72
9 14 Días	5	125	92.03	0.73624	25	283	11.32

Tabla 23. Resultados y propiedades de la tercera dosificación a 28 días de curado por inmersión total.

CUBO	LADOS	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD	ÁREA	COMPRESIÓN	F´C
	CM	CM3	GR	GR/CM3	CM2	KG	KG/CM2
1 28 Días	5	125	92.2	0.73880	25	400	16.00
2 28 Días	5	125	92.35	0.74696	25	270	10.80
3 28 Días	5	125	93.37	0.73600	25	294	11.76
4 28 Días	5	125	92	0.76360	25	313	12.52
5 28 Días	5	125	95.45	0.77344	25	311	12.44
6 28 Días	5	125	96.68	0.81776	25	310	12.40
7 28 Días	5	125	102.22	0.74480	25	273	10.92
8 28 Días	5	125	93.1	0.76920	25	335	13.40
9 28 Días	5	125	96.15	0.76920	25	291	11.64

Gráfica de resistencia a compresión para la tercera dosificación con poliestireno reciclado en diferentes edades de curado

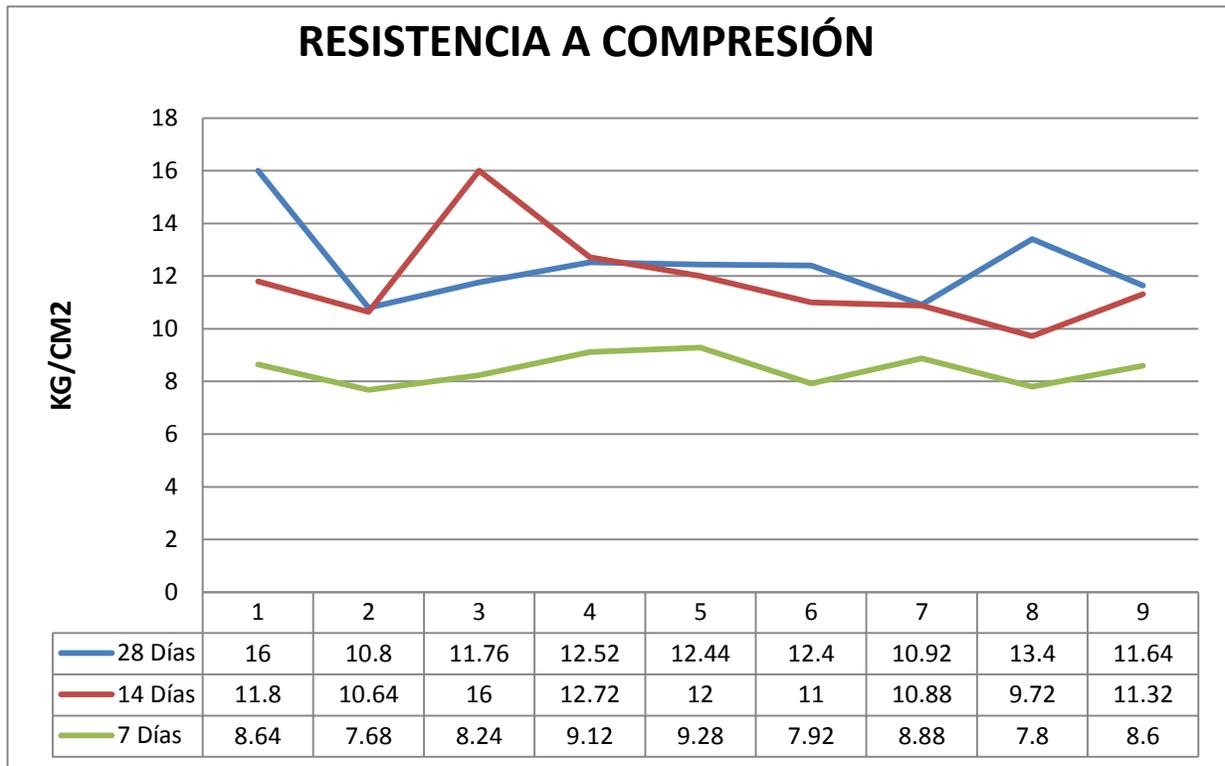


Figura 54. Gráfica de resultados a compresión con poliestireno reciclado

4.2 Bloques de mampostería, etapa final.

Con los resultados obtenidos de los morteros, se decidió utilizar la mezcla 1 para realizar bloques de mampostería con dimensiones de 6 x 15 x 25 cm. Se realizaron 30 bloques de mampostería y se dividieron en tres grupos dependiendo el tiempo de curado en 7, 14 y 28 días.

Todos los bloques de mampostería fueron llevados al cuarto de curado para su sumersión total.

4.2.1 Dosificación para bloques de mampostería.

Tabla 24. Dosificación para bloques de mampostería.

PROPORCION	CANTIDAD	PARA 30 BLOQUES	
Cemento	40 kg		
Agua	18 lt		
Poliestireno reciclado	0.75kg		

4.2.2. Resultados bloques de mampostería.

A continuación se presentan las tablas con los resultados de los bloques de mampostería en diferentes edades de curado, se presentan los resultados de resistencia a flexión, resistencia a compresión, absorción inicial y absorción a 24 horas.

Tabla 25. Resultados bloques de mampostería a 7 días de curado

CARACTERÍSTICAS A 7 DÍAS DE CURADO										
BLOQUE	Espesor (cm)	Ancho (cm)	Long. (cm)	Long. % apoyos (cm)	Long. (cm) compresión	Área transv. compresión (cm ²)	Carga máx. Flexión (kg)	Carga máx. compresión (kg)	Esfuerzo a flexión, MOR (Kg/cm ²)	Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)
1	6	15	25	20	12.5	187.5	250	7380	13.889	39.360
2	6	15	25	20	13	195	167	7959	9.278	40.815
3	6	15	25	20	13	195	210.9	8100	11.717	41.538
4	6	15	25	20	12	180	187.6	6996	10.422	38.867
5	6	15	25	20	13	195	173	7455	9.611	38.231
6	6	15	25	20	13	195	151	7559	8.389	38.764
7	6	15	25	20	13.5	202.5	217	8253	12.056	40.756
8	6	15	25	20	11.5	172.5	179	7461	9.944	43.252
9	6	15	25	20	12.5	187.5	188.6	7612	10.478	40.597
10	6	15	25	20	13	195	210	8154	11.667	41.815

BLOQUE	Peso seco (kg)	Peso absorción inicial (kg)	% de agua abs. Inicial	Peso absorción 24 hrs (kg)	% de agua 24 hrs
1	0.945	0.949	0.4233	1.056	11.251
2	0.935	0.938	0.3209	1.045	11.519
3	0.923	0.927	0.4334	1.033	8.141
4	1.031	1.036	0.4850	1.146	10.989
5	0.912	0.915	0.3289	1.022	12.124
6	0.92	0.924	0.4348	1.03	11.677
7	0.901	0.905	0.4440	1.01	11.006
8	1.017	1.022	0.4916	1.132	11.229
9	0.985	0.989	0.4061	1.1	11.984
10	0.976	0.979	0.3074	1.094	11.675

Tabla 26. Resultados bloques de mampostería a 14 días de curado.

CARACTERÍSTICAS A 14 DÍAS DE CURADO										
BLOQUE	Espesor (cm)	Ancho (cm)	Long. (cm)	Long. % apoyos (cm)	Long. (cm) compresión	Área transv. Compresión (cm ²)	Carga max. Flexión (kg)	Carga máx. Compresión (kg)	Esfuerzo a flexión, MOR (Kg/cm ²)	Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)
1	6	15	25	20	12.5	187.5	210	8300	11.667	44.267
2	6	15	25	20	13	195	230	7800	12.778	40.000
3	6	15	25	20	13	195	215	8500	11.944	43.590
4	6	15	25	20	12.5	187.5	189	8000	10.500	42.667
5	6	15	25	20	12	180	198	8600	11.000	47.778
6	6	15	25	20	13	195	205	8100	11.389	41.538
7	6	15	25	20	12.5	187.5	245	7700	13.611	41.067
8	6	15	25	20	12	180	188	8560	10.444	47.556
9	6	15	25	20	12.5	187.5	195	7850	10.833	41.867
10	6	15	25	20	13	195	200	8962	11.111	45.959

BLOQUE	Peso seco (kg)	Peso absorción inicial (kg)	% de agua abs. Inicial	Peso absorción 24 hrs (kg)	% de agua 24 hrs
1	0.951	0.955	0.421	1.058	11.777
2	1.007	1.012	0.497	1.123	11.492
3	1.081	1.085	0.370	1.169	11.174
4	1.183	1.188	0.423	1.313	11.194
5	0.998	1.003	0.501	1.119	12.161
6	1.002	1.007	0.499	1.119	11.173
7	0.954	0.958	0.419	1.059	11.952
8	1.033	1.038	0.484	1.149	12.177
9	0.993	0.997	0.403	1.112	11.359
10	1.045	1.049	0.383	1.167	12.435

Tabla 27. Resultados bloques de mampostería a 28 días de curado.

CARACTERISTICAS A 28 DÍAS DE CURADO										
BLOQUE	Espesor (cm)	Ancho (cm)	Long. (cm)	Long. % apoyos (cm)	Long. (cm) compresión	Área transv. Compresión (cm ²)	Carga máx. Flexión (kg)	Carga máx. Compresión (kg)	Esfuerzo a flexión, MOR (Kg/cm ²)	Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)
1	6	15	25	20	12.5	187.5	210	8300	11.765	47.535
2	6	15	25	20	13	195	230	7800	12.435	52.230
3	6	15	25	20	13	195	215	8500	12.334	51.340
4	6	15	25	20	12.5	187.5	189	8000	11.556	48.763
5	6	15	25	20	12	180	198	8600	11.674	48.342
6	6	15	25	20	13	195	205	8100	11.788	49.780
7	6	15	25	20	12.5	187.5	245	7700	12.454	52.430
8	6	15	25	20	12	180	188	8560	12.653	46.432
9	6	15	25	20	12.5	187.5	195	7850	12.345	51.320
10	6	15	25	20	13	195	200	8962	11.985	50.230

BLOQUE	Peso seco (kg)	Peso absorción inicial (kg)	% de agua abs. Inicial	Peso absorción 24 hrs (kg)	% de agua 24 hrs
1	0.985	0.989	0.406	1.101	11.746
2	0.992	0.996	0.403	1.106	11.765
3	1.056	1.061	0.473	1.174	11.918
4	1.072	1.077	0.466	1.192	11.154
5	0.995	0.999	0.402	1.116	12.061
6	1.083	1.088	0.462	1.204	11.957
7	1.004	1.009	0.498	1.124	12.098
8	0.928	0.933	0.539	1.041	11.308
9	0.986	0.991	0.507	1.098	11.675
10	0.965	0.969	0.415	1.085	12.090

4.2.3. Desviación estándar en pruebas.

Tabla 28. Desviación estándar para bloques de mampostería a 7 días de curado.

Promedios-desviación estándar 7 días							
Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Resis. Comp Max	Resis. Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
10.75	1.61	40.40	1.58	0.41	0.07	11.16	0.33

Tabla 29. Desviación estándar para bloques de mampostería a 14 días de curado.

Promedios-desviación estándar 14 días							
Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Resis. Comp Max	Resis. Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
11.53	1.02	43.63	2.72	0.44	0.05	11.69	1.13

Tabla 30. Desviación estándar para bloques de mampostería a 28 días de curado.

Promedios-desviación estándar 28 días							
Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
MOR	MOR	Resis. Comp Max	Resis. Comp Max	% Abs Inicial	% Abs Inicial	% Abs 24 hrs	% Abs 24 hrs
12.10	0.94	49.84	3.44	0.46	0.05	11.78	0.47

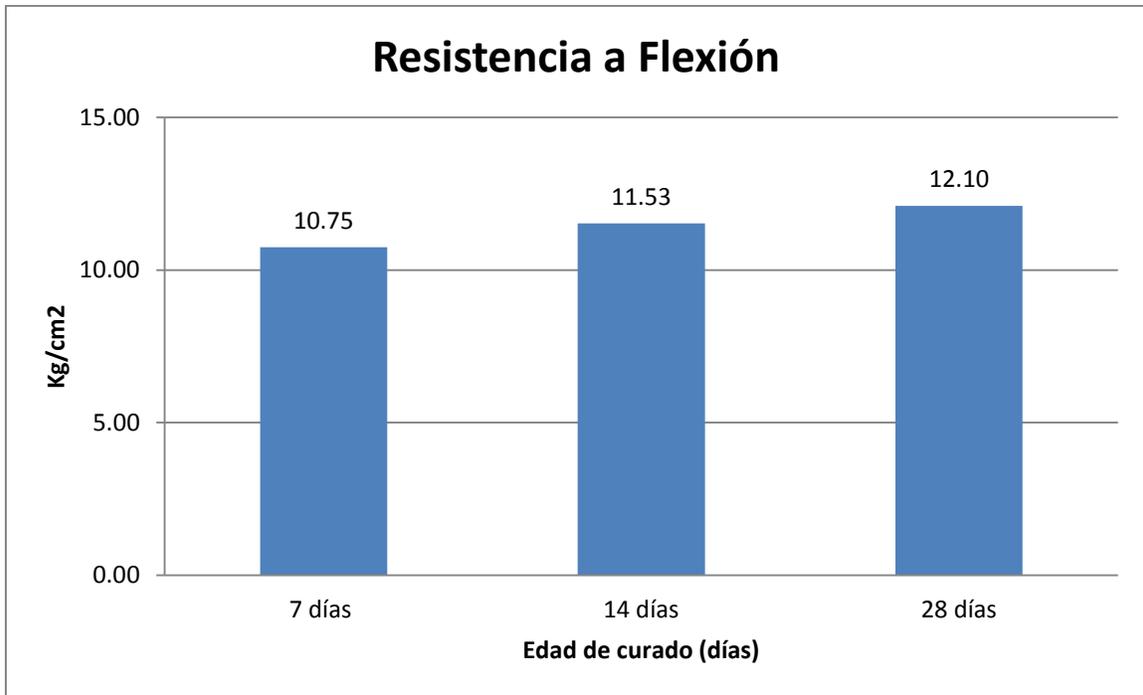


Figura 55. Gráfica de desviación estándar de resistencia a flexión

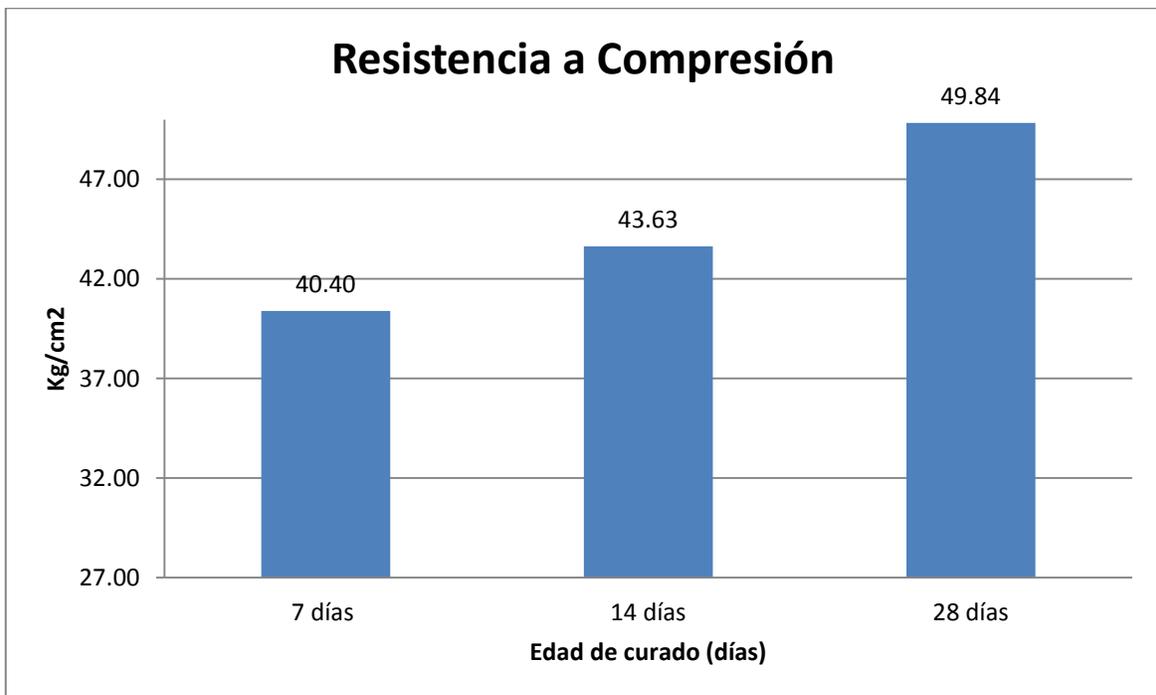


Figura 56. Gráfica de desviación estándar de resistencia a compresión

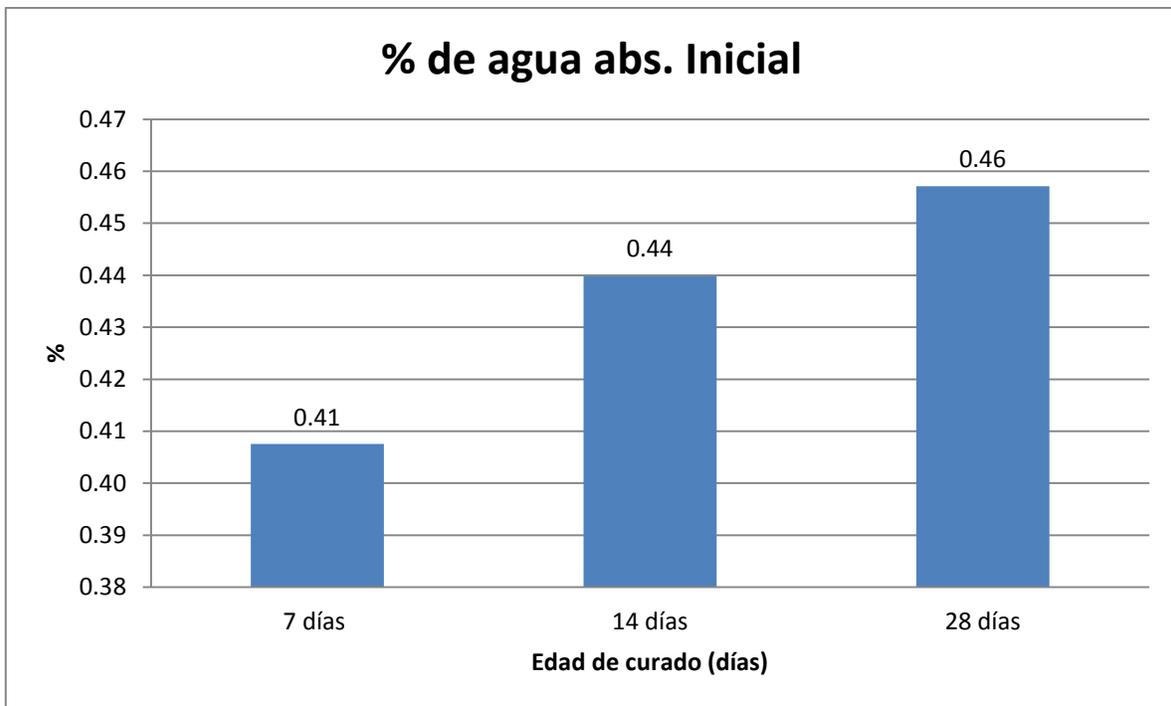


Figura 57. Gráfica de desviación estándar de % de absorción inicial de agua.

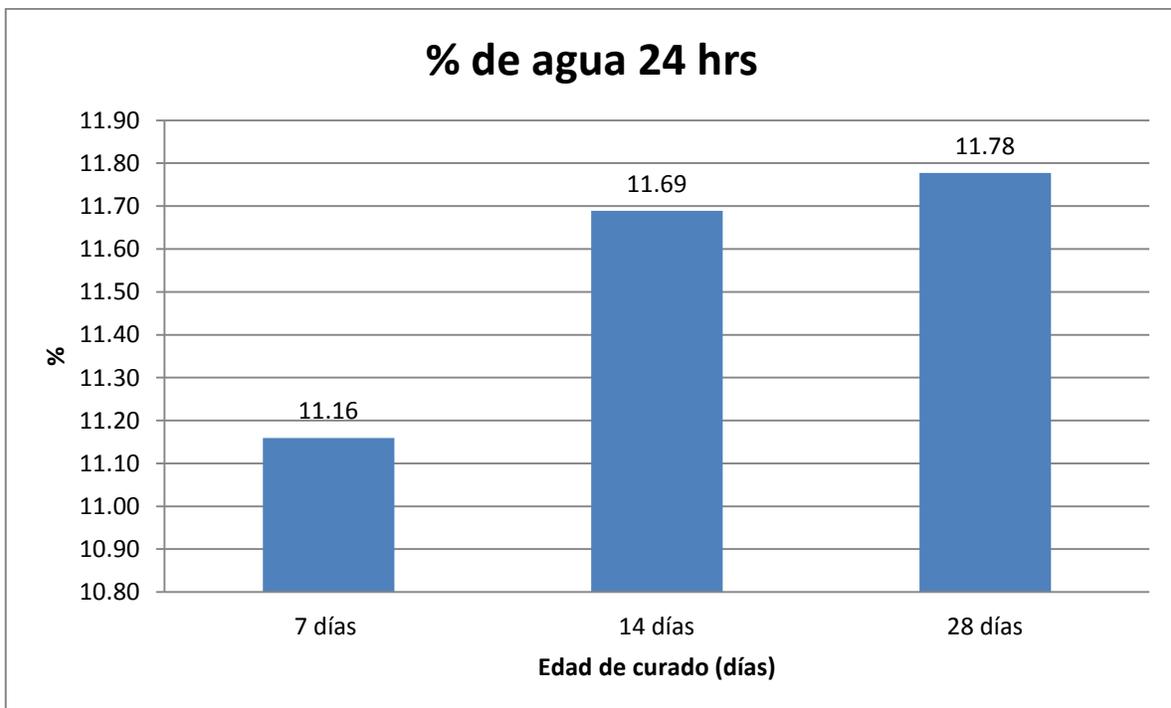


Figura 58. Gráfica de desviación estándar de % de absorción final 24 horas.

4.2.4. Coeficiente de conductividad térmica.

Esta prueba fue realizada en el laboratorio de conductividad térmica en el Centro Nacional de Metrología CENAM, gracias a la colaboración y el apoyo del Dr. Leonel Lira Cortes encargado del laboratorio de conductividad térmica y de Saúl García Duarte operador y calibrador del equipo. En la tabla 31 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 31. Resultados de la prueba térmica.

<i>cenam</i>	
Laboratorio de Conductividad Térmica	
Nombre del Operador: Saúl García Duarte	Número de Prueba: Siete Duración de la Prueba: 210 horas
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: Block Unicemento	
Identificación: Muestra de material de unigel y cemento	
Características: Material no- homogéneo de unigel y cemento de 70 mm de espesor	
Dimensiones: Placa rígida de 70 mm de espesor y 270 x 140 mm de lados.	
Notas: La temperatura de la prueba entre 18 y 30 °C para la operación de su material	
DESCRIPCIÓN DEL APARATO: Aparato de placa caliente con guarda (APCG).	
Orientación de los platos: Horizontal	
Modo de operación: doble lado de medición	
PROCEDIMIENTO DE PRUEBA: Aparato de placa caliente con guarda (APCG)	
Valores Experimentales	
Nombre de la variable:	Valor Promedio:
Potencia disipada durante la prueba	1.97 W
Temperatura en la placa caliente	33.9 °C
Temperatura en la placa fría	17.0 °C
Gradiente de temperatura en la muestra	16.9 °C
Temperatura media o de la prueba	25.5 °C
Temperatura ambiente	20.1 °C
Humedad relativa	63 %
Espesor de la muestra	70 mm
Área de medición	21 406 mm ²
Peso	2.1 kg
Densidad	
Resultados:	
Conductividad térmica aparente	0.203 W/K m
Resistencia térmica	
Incertidumbre Expandida ($k=2$)	8 %

Como se muestra en la tabla 32 se obtuvo un coeficiente de conductividad térmica de $\lambda = 0.203 \text{ W/Km}$. Valor que se encuentra por debajo de los materiales tradicionales.

Tabla 32. Coeficientes térmicos de los materiales.

MATERIAL	K (W/mk)
Cobre	385.00
Aluminio	205.00
Latón	109.00
Acero	58.00
Mármol	3.50
Arena y grava	2.00
Concreto	1.63
Mortero	1.40
Vidrio plano	1.20
ladrillo macizo	.80
Roca natural porosa	.55
Tierra vegetal	.52
Ladrillo artesanal	.50
Ladrillo refractario	.35
Enlucido de Yeso	.45
Adobe	.30
Tableros de fibras de madera	.25
Mortero de poliestireno	.20
Poliestireno Expandido	.04
Lana natural	.025

4.2.5. Reacción al fuego

El bloque fue introducido en un horno a altas temperaturas, como se muestra en la figura 59. Teniendo como resultado un material poroso, es decir por arriba de los 110°C el poliestireno dentro del bloque se funde quedando un material celular.



Figura 59. Bloque en horno a 110°C.

Por otro lado el material fue sometido al fuego de manera directa, como se muestra en la figura 60. Obteniendo la porosidad solamente en la parte directa de la llama y manteniendo las propiedades originales en la parte más alejada de la flama.



Figura 60. Bloque sometido al fuego de manera directa.

4.2.6. Porosidad.

Como ya se había mencionado en el capítulo anterior la porosidad es una de las principales características de un material aislante y ésta es determinada por:

$V_a - V_r = e$, donde

V_a , es el volumen aparente.

V_r , el volumen real.

e , los espacios vacíos.

Aplicando esta ecuación obtenemos un coeficiente de porosidad de 60%. Como podemos observar en la tabla 33 el material tiene una porosidad por arriba de otros materiales utilizados en la construcción, dando como resultado tener un material con excelentes propiedades térmicas y acústicas.

Tabla 33. Coeficientes de porosidad de algunos materiales.

MATERIAL	COEFICIENTE POROSIDAD %
Bloque ligero con poliestireno	60 %
Ladrillos comunes	36 %
Mortero	38 %
Ladrillos de máquina	33 %
Tejas comunes	29 %
Maderas blandas	25 %
Pizarra	10 %
Mármoles	2.3 a 4.5 %
Granitos	.6 a 4 %
Baldosas de cemento	0.46 %

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Al término de este trabajo de investigación se concluye que los resultados fueron positivos, ya que se encontró al menos una dosificación para fabricar un mortero de baja densidad con poliestireno reciclado con una resistencia a compresión promedio de 45 kg/cm^2 . El objetivo de este trabajo de investigación se alcanzó satisfactoriamente, logrando las siguientes conclusiones:

- Se obtuvo un material con numerables ventajas en cuanto a: Ligereza (50% más liviano), factor térmico (0.203 W/km) y acústico, permeabilidad (0.34%), porosidad (60%), resistencia (50 kg/cm^2).
- La incursión del poliestireno reciclado, provoca un decremento del peso en casi un 50% en comparación del mortero base. De igual forma al realizar piezas de mampostería con este material obtenemos bloques con la mitad del peso en comparación con un tabique rojo recocido.
- Se logró un material con excelentes propiedades térmicas, gracias a la incursión del poliestireno como agregado, obteniendo un factor térmico de $k= 0.203 \text{ W/km}$, factor que se encuentra por debajo de los materiales convencionales como lo son el adobe $k= 0.3 \text{ W/km}$ y el tabique rojo recocido $k= 0.5 \text{ W/km}$.
- A través de pruebas de absorción se encontró que, la presencia del poliestireno en el mortero ayuda a obtener un material poco absorbente, con coeficiente de absorción de 0.4%.
- Es muy importante mantener una relación agua/cemento de 0.45, para tener una buena trabajabilidad al momento de realizar la mezcla.

- La resistencia del mortero se mantiene con o sin poliestireno. Es decir si el material es introducido a un horno a 110° C, el poliestireno se fundirá, quedando un material poroso.
- La resistencia final del mortero con poliestireno reciclado es alcanzada a los 28 días con una resistencia de 50kg/cm², manteniendo durante este tiempo al material en un estado de curado bajo sumersión total.
- La resistencia a la compresión en las distintas mezclas cumple con los rangos que marca la norma para morteros no estructurales.
- De acuerdo a los resultados mostrados en el presente trabajo, se pueden recomendar los morteros con poliestireno reciclado para el uso en la industria de la construcción.

Trabajos por realizar:

Debido a que la presente investigación abarca sólo algunas variables a medir se considera que restan los siguientes trabajos por realizar.

- Reducir la cantidad de cemento y agregar otro tipo de aglutinante, para reducir su costo de fabricación.
- Evaluar la transmisión acústica del mortero.
- Realizar paneles de dimensiones mayores.
- Evaluar el comportamiento del mortero en una construcción.
- Realizar una pequeña construcción para evaluar el comportamiento del material en las diferentes temperaturas ambientales.

REFERENCIAS

1. ACI Committee 523. Guide for Design and Construction with Autoclaved Aerated Concrete Panels". *American Concrete Institute Committee Reports*. June , 2009. E. U. A.
2. ACI. (American Concrete Institute). [Al final del espectro del concreto ligero. Concreto ligero estructural]. "At the high end of the lightweight concrete spectrum. Structural lightweight concrete". *The Aberdeen Group*. 1981. U. S. A.
3. ACI. "Aggregates for concrete". ACI Education Bulletin E1-07, 2007.
4. Alvarado Ruiz, Sergio Roberto. (1995). Desarrollo de una metodología para la fabricación de concreto celular.
5. BUINY. " Concreto Celular". Bufete de Ingeniería de Yucatán. Enero, 2009.
6. Canahuati Kurwahn E. Emilio. (1998). Ahorro energético mediante la utilización de concreto celular en viviendas.
7. CELDACRET. "Concretos Celulares" CELDACRET. Agosto, 2009.
8. Chandra, Satish. Bemtsson, Leif. *Lightweight Aggregate Concrete. Science, Technology and Applications*. Noyes Publications/William Andrew Publishing. Building Materials Series. 2003. Norwich, Nueva York, E. U. A.
9. *Technology and Applications*. Noyes Publications/William Andrew Publishing. Building Materials Series. 2003. Norwich, Nueva York, E. U. A.
10. Concretos Celulares Ltda. "Concretos Celulares". CCL. Septiembre 2009.
11. Cordon, W. A., "Entrained Air-A Factor in the Design of Concrete Mixes". Materials Laboratories Report No.C310, Research and Geology Division, Denver, 1946.
12. Del Ángel, Karina. (2006, 27 de julio). Desarrollan concreto celular más ligero y resistente, [en línea]. D.F., México. Once Noticias. Recuperado el 15 de junio de 2009 de
13. http://onctv-ipn.net/noticias/index.php?modulo=despliegue&dt_fecha=2006-07-27&numnota=38
14. De Ayala Izaguirre, María. "Concreto aireado para la vivienda de interés social". 140 *IMCYC*. Julio, 1998. México, D. F. de noviembre. Edición 681. 2002. Mérida, Yucatán.
15. Elizondo Focil, Adolfo. Caracterización del concreto celular elaborado con espuma preformada [recurso electrónico]. Monterrey: Tecnológico de Monterrey, 2006.
16. Gilkey, H. J., "Re-Proportioning of Concrete Mixtures for Air Entrainment". Journal of the American Concret Institute. Michigan 1958.
17. HEBEL."Sistema de Muros y Losas HEBEL". HEBEL. OCTUBRE, 2009.

18. Huerta, Raúl. "Concretos ligeros". Revista Asociación Argentina del Hormigón Preparad. Diciembre, 2004.
19. LITEBUILT, Tecnología de concreto aireado, ligero y espumoso. *PAN PACIFIC GROUP OF COMPANIES*
20. Neville, Adam M. *Tecnología del Concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. 1992. México, D.F.
21. NRMCA. (*National Ready Mixed Concrete Association*). (*¿Qué, por qué y cómo? Concreto Ligero Estructural*]. "What, Why & How? Structural Lightweight Concrete". 2003. E. U. A.
22. NRMCA. "Concrete in Practice". National Ready Mixed Concrete Association, 2003
23. Organista Valdiosera, Eduardo S. Tesis de Posgrado. *Optimización en el diseño de mezclas, osificación, producción y propiedades de concreto celular hecho a base de agentes espumantes*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey. 1999. Monterrey, Nuevo León.
24. PCA. "Diseño y Control de Mezclas de Concreto". Portland Cement Association. México. 2004.
25. Pérez, Mireya (2006, junio). Un repaso del concreto celular, [en línea]. D.F., México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
26. Pinto, Roberto C. A. y Hover, Kenneth C., "Frost and Scaling Resistance of High-Strength Concrete". Research and Development Bulletin RD122, Portland Cement Association, 2001.
27. Schierhorn, Carolyn, Is the U.S. ready for cellular concret block?. *The Aberdeen Group*. 1994. U. S. A.
28. The Aberdeen Group. " Cellular Concrete". Publication #C63005, 1963
29. The Aberdeen Group. " Structural lightweight concrete". Publication #C810247, 1981.
30. Tommy Y. Lo y H.Z. Cui."Properties of green lighthweight aggregate concrete" Universidad de Hong Kong, 2004.
31. CONCRESA. "Concreto Celular". CONCRESA. Septiembre 2009
<http://www.concreta.com/Concreto%20Celular.pdf>