

Tesina

Universidad Politécnica de Cataluña  
Máster en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente

**Estudio de hormigones y morteros aligerados con agregados  
de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla**

Autor:  
**Antonella Costa Del Pozo**

Tutor:  
**Jaume Avellaneda Díaz Grande**

Barcelona 2012



A mis padres, Lucho y Marion, por enseñarme la vida,  
y a mi hermano, Giorgio, por aprender a vivirla conmigo,  
entre cuentos de fantasía y el día a día.



## Agradecimientos

A mi profesor y tutor, Jaume Avellaneda, por todo el apoyo que me brindó y la confianza que tuvo en mí para el desarrollo de esta tesina y todo lo que implicaba, en el campo de estudios teóricos y en el lado experimental. Fueron estudios dentro de campos conocidos como la parte arquitectónica y la de sostenibilidad, y otros que involucraban campos por conocer, como el de ingeniería. Y sabiendo que podía ser algo arriesgado emprender ese camino experimental en un período relativamente corto de tiempo, decidió apostar por mí.

A todas las personas que me ayudaron en la campaña experimental, en el laboratorio de la Escuela Politécnica Superior de Edificaciones de Barcelona (EPSEB); Joan Ramon Rosell, Antonia Navarro, y todo el equipo, que tuvieron la paciencia de enseñarme sea contestando mis preguntas o que ampliaron mis conocimientos acerca de la preparación de probetas o de ensayos, o que estuvieron cuando necesité manos para poder utilizar algunas máquinas, como la bloquera.

A Cesar Reyes, autor de la tesis doctoral "Estudio del comportamiento de morteros reforzados con fibras de maíz, para componentes de viviendas de bajo coste", por darnos parte de su tiempo para explicarnos el funcionamiento de la bloquera en el laboratorio, al ya él tener una experiencia previa. Él brindó tanto sus conocimientos como su ayuda, otro par de manos para la fabricación de los primeros bloques.

A la Recicladora de plástico Plasper, especialmente a Lluís Pérez, gerente general de Plasper y a María Pais, gerente de R & D,

por darnos parte de su tiempo para recibirnos y proporcionarnos el material para la experimentación, por la información brindada y la confianza depositada para una investigación que pudo desarrollarse gracias a sus materiales.

A mis padres, por el apoyo incondicional en todo aspecto, moral, sentimental, económico y sobre todo por ese entusiasmo que siempre me transmitieron, fue el motor que me dio ánimos y fuerzas. Gracias a ellos estoy donde me encuentro. A mi hermano, quien me apoyó moralmente todo el camino y a lo lejos me inspiró con sus propias vivencias y la experiencia de su brillante tesis. Les agradezco muchísimo por toda la confianza que ustedes siempre tuvieron en mí. Son mi roca.

A mis profesores, por todas las enseñanzas y los conocimientos transmitidos, por instarme a investigar y a tener mucha curiosidad acerca de los temas tratados, por el tiempo que me dedicaron y la paciencia que me tuvieron, por ayudarme a crecer profesional y personalmente.

A mis compañeros de piso y buenos amigos, por el apoyo moral y la ayuda que necesité para poder tener tiempo para trabajar, espacio cuando lo necesité, por darme una mano cuando me faltaban a mí, y por darme ánimos.

A mis amigos, que me alentaron a dar lo mejor de mí, mis compañeros del máster, mis amigos en Barcelona y mis amigos a la distancia, en China o en Perú, manitos y amigos, les agradezco por estar ahí, ya sea para darme fuerzas y valor, ganas de trabajar y sacar lo mejor de mí, distraerme cuando lo necesité y sobre todo por confiar en mí.



## RESUMEN

---

El objetivo de la investigación desarrollada es utilizar gránulos de plástico reciclado como agregado en la mezcla de morteros en sustitución de una fracción de áridos o agregados naturales. Se reduce la densidad del mortero con el consiguiente aumento del aislamiento térmico y al mismo tiempo se da un nuevo uso al PVC reciclado. La investigación estudia diferentes dosificaciones y determina las características mecánicas y térmicas de cada una de ellas.

Esta tesina está estructurada en seis partes:

La **Parte uno, Introducción**, consiste básicamente en una explicación de la investigación desarrollada, los objetivos planteados y la metodología del trabajo, habiendo una parte teórica y una parte práctica en este estudio.

La **Parte dos, Teoría**, siendo la más teórica, nos lleva a plantear la problemática que trae el plástico desechado, estudiar la situación del plástico y el plástico reciclado, tomando como ejemplo Europa. Asimismo, se analiza el hormigón y el mortero convencional, sus características principales y se plantea el impacto ambiental que este genera. De igual manera se estudia el hormigón y el mortero aligerado, sus propiedades y las clases de árido ligero que contienen. Se introduce el estudio de la posibilidad de cambiar estos agregados por plástico reciclado, para ver la posibilidad de si este mortero mantiene ciertas características como la resistencia, si puede tener menos peso y densidad, y si es que

puede tener algún valor agregado, que sería el aislamiento térmico que puede proporcionar el plástico reciclado.

Posteriormente, se desarrolla el estado del arte del tema en mención. Entre ellos se encuentran estudios sobre el hormigón ligero, sobre el hormigón ligero con agregados de plástico reciclado y las distintas investigaciones realizadas con distintos tipos de plástico, y lo que existe ya construido con estos hormigones. Se han realizado ensayos que se verán más adelante, con probetas conteniendo morteros con agregados de plástico, para estudiar las resistencias y densidades que posee. Se han encontrado resultados interesantes que marcan una línea de estudio, la cual se complementará con esta investigación y estudiará las resistencias a compresión y flexo tracción del material, la reología, para conocer la deformación y plasticidad, la porosidad y densidad del material, el módulo de elasticidad y principalmente se estudiará la conductividad térmica que posee.

La **Parte tres, Metodología**, es el centro de la investigación en cuestión. Se crea una campaña experimental para poder analizar las características del mortero con agregados de plástico reciclado. Se inicia planteando las características que se esperan tener, físicas y mecánicas, y luego se determinan las cantidades y proporciones a utilizarse para hacer la mezcla del mortero, según lo estudiado. Se desarrollarán dos muestras para estudiar el aislamiento térmico y dos probetas de tres muestras cada una,

que servirán para los ensayos de resistencias, reología y módulo de elasticidad. Cada grupo de ocho probetas tendrán distintas dosificaciones de plástico reciclado de PVC; la primera sin plástico, para tener una mezcla de mortero convencional, la segunda con 10% de agregados de plástico reciclado, la tercera con 25% de plástico reciclado, la cuarta con 50% de plástico y la quinta con 70% de plástico. Además se fabricarán dos tipos de probeta más, con plástico reciclado que contiene carbono, de la misma granulometría que el plástico reciclado de PVC utilizado en las muestras anteriores. Se crearán probetas con el 25% y 70% de este plástico. Posteriormente, estas probetas se dejarán fraguar y luego se realizarán las pruebas pertinentes para poder comparar las características obtenidas, con lo que se esperaba obtener. Más adelante, se fabricarán bloques de mortero a escala real, con las mezclas de mortero con plástico reciclado en dosificaciones de 25%, 50% y 70%, para estudiar la posibilidad de armar bloques con los morteros utilizados y saber si realmente funcionan y si son consistentes y sólidos.

La **Parte cuatro, Resultados**, muestra los resultados de esta campaña experimental. Las probetas, luego de 28 días de fraguado, serán estudiadas para ver sus comportamientos según las dosificaciones. Las probetas perdieron propiedades mecánicas, en orden de menor cantidad de plástico a mayor, y de menor densidad cada vez, como también aparece en artículos acerca de estudios realizados previamente. Posteriormente se desarrollarán las

conclusiones de esta experimentación, en base a los resultados obtenidos. Se puede concluir que mientras existe mayor cantidad de plástico reciclado en la mezcla, la trabajabilidad del mortero decrece, así como la densidad también. Se debe llegar a un equilibrio en donde la baja densidad no sacrifique tanto las características mecánicas ni físicas del material, por lo que las probetas con 25% de plástico reciclado parecen ser las más adecuadas en mantener cierto nivel de trabajabilidad, y una menor densidad, una combinación más equilibrada. Asimismo, el mortero con agregados de plástico, sirve como aislamiento térmico, como se verá en la investigación y en la campaña experimental.

En la **Parte Cinco, Propuestas**, se buscan las maneras de aplicar este material mejorado, dependiendo si sirve estructuralmente o para bloques de mortero para muros de cerramiento, o para soleras y revestimientos. Se identifican posibles usos y posteriormente se hace una propuesta.

La **Parte seis, Conclusión Final**, es la conclusión de la investigación realizada y de cómo se logra reutilizar el plástico reciclado, cerrando su ciclo al insertarlo en el del mortero en la construcción, para los distintos usos que se plantean según sus resistencias, y de cómo es que se disminuye el impacto ambiental de este material, junto con las densidades, lo que se sacrifica y lo que se gana, – la conductividad térmica – siguiendo un equilibrio ya mencionado.

La **Parte siete, Bibliografía**, enumera todas las fuentes utilizadas, tanto libros como artículos de revista y tesis doctorales.

## INDICE

---

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	23
<b>1.1. Definición Básica del Proyecto</b> .....	23
<b>1.2. Objetivos</b> .....	24
1.2.1. Objetivo General	
1.2.2. Objetivos Específicos	
<b>1.3. Alcances y Límites de la Investigación</b> .....	25
<b>1.4. Metodología de Trabajo</b> .....	25
1.4.1. Recopilación Bibliográfica	
1.4.2. Campaña Experimental	
<b>1.5. Estructura de la Tesina</b> .....	26
<b>2. TEORÍA</b> .....	29
<b>2.1. Planteamiento del tema</b> .....	29
2.1.1. Situación y usos del plástico	
2.1.2. Reciclaje de plástico	
2.1.3. El hormigón y su impacto ambiental	
2.1.4. Hormigón convencional	
2.1.5. Hormigón ligero	
2.1.6. Áridos y carga ligera	
2.1.6.1. Áridos ligeros naturales	
2.1.6.2. Áridos ligeros artificiales y reciclados	
2.1.7. Problemas causados por los distintos áridos utilizados en el hormigón ligero	
<b>2.2. Estado del Arte</b> .....	42
2.2.1. Estudios acerca del hormigón ligero	
2.2.2. Estudios acerca del plástico reciclado	
2.2.3. Investigaciones acerca del hormigón ligero con agregados de plástico reciclado	
<b>2.3. Hipótesis de trabajo</b> .....	51
<b>3. PLAN DE ENSAYOS</b> .....	53
<b>3.1. Teoría e Investigación</b> .....	53
<b>3.2. Campaña Experimental: Creación del mortero aligerado con agregados de plástico reciclado</b> .....	54
3.2.1. Determinación de características físicas y resistencias del material	

3.2.2. Probetas para Ensayos	
3.2.2.1. Reología	
3.2.2.2. Conductividad térmica	
3.2.2.3. Módulo de elasticidad	
3.2.2.4. Resistencias a flexo tracción	
3.2.2.5. Resistencias a compresión	
3.2.2.6. Densidad aparente y relativa e índice de porosidad	
<b>4. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>75</b>
<b>4.1. Características físicas y resistencias obtenidas</b>	<b>75</b>
4.1.1. Reología	
4.1.2. Conductividad térmica	
4.1.3. Módulo de elasticidad	
4.1.4. Resistencias a flexo tracción	
4.1.5. Resistencias a compresión	
4.1.6. Densidad aparente y relativa e índice de porosidad	
<b>4.2. Resumen de los resultados</b>	<b>84</b>
<b>4.3. Conclusiones del experimento</b>	<b>85</b>
<b>5. PROPUESTAS</b>	<b>89</b>
<b>5.1. Características de elementos constructivos hechos con mortero con agregados de plástico reciclado</b>	<b>89</b>
<b>5.2. Propuestas de aplicación para el mortero resultante</b>	<b>91</b>
5.2.1. Bloques de carga	
5.2.2. Tejas hechas de mortero	
5.2.3. Soleras, pavimentos y revoques	
<b>6. CONCLUSIONES FINALES</b>	<b>99</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>103</b>
<b>7.1. Bibliografía general</b>	<b>103</b>
<b>7.2. Bibliografía específica sobre el tema</b>	<b>103</b>
7.2.1. Libros	
7.2.2. Artículos de revistas	
7.2.3. Proyectos finales de carrera, tesinas y tesis doctorales	
<b>8. ANEXOS</b>	<b>107</b>

## INDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Datos de consume y residuos de plástico en toneladas

Fuente: Waste Management: "Use of recycled plastic in concrete: A review" (R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur)

Tabla 2. Usos del plástico nuevo y plástico reciclado

Fuente: Recycling and Resource Recovery Council, 1994

Tabla 3. Clasificación de los áridos ligeros según la consistencia de sus granos y valores de orientación de las máximas resistencias a la compresión alcanzables por el hormigón

Fuente: Hormigones ligeros armados. Fabricación, propiedades, aplicaciones. Weigler, Helmut – Karl, Sieghart

Tabla 4. Resultados de las pruebas de consistencia para el valor de escurrimiento (mm) y densidad aparente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) con la mezcla de hormigón fresco

Fuente: Propia.

Tabla 5. Clases de densidades de cálculo correspondientes a hormigones de árido ligero según la Norma Experimental ENV 206.

Fuente: Eurocódigo 2, Capítulo 1-4. AENOR (1997).

Tabla 6. Clases de hormigón y resistencias características a compresión  $f_{\text{ck}}$  del hormigón de árido ligero ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ).

Fuente: Eurocódigo 2, Capítulo 1-4. AENOR (1997).

Tabla 7. Resultados de ensayo de propiedades térmicas.

Fuente: Propia.

Tabla 8. Resultados de ensayo de Módulo de elasticidad (MOE).

Fuente: Propia.

Tabla 9. Resultados de ensayo de resistencias a flexo tracción ( $1 \text{ N}/\text{mm}^2 = 1 \text{ MPa} = 10,19 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ ).

Fuente: Antonia Navarro Ezquerra, Laboratorio de Materiales de la EPSEB

Tabla 10. Resultados de ensayo de resistencias a compresión ( $1 \text{ N}/\text{mm}^2 = 1 \text{ MPa} = 10,19 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ ).

Fuente: Antonia Navarro Ezquerra, Laboratorio de Materiales de la EPSEB

Tabla 11. Resultados de ensayo de Densidad relativa, aparente e índice de porosidad.

Fuente: Antonia Navarro Ezquerra, Laboratorio de Materiales de la EPSEB

Tabla 12. Cuadro comparativo resumen de los resultados obtenidos en los ensayos.

Fuente: Propia.

Tabla 13. Valores aproximados de difusividad térmica, conductividad térmica y calor específico volumétrico de algunos materiales de construcción.

Fuente: Introduction to building physics, Carl Eric Hagentoft, 2003

Tabla 14. Valores de difusividad térmica, conductividad térmica, calor específico volumétrico y efusividad térmica para las mezclas de mortero con agregados de plástico reciclado.

Fuente: Propia.

Tabla 15. Valores aproximados de efusividad térmica de algunos materiales de construcción.

Fuente: Introduction to building physics, Carl Eric Hagentoft, 2003

Tabla 16. Transmitancia térmica (U) y Resistencia térmica (R) de las mezclas de mortero.

Fuente: Propia.

Tabla 17. Resistencia de los morteros con agregados de plástico reciclado.

Fuente: Propia.

Tabla 18. Cálculo de un muro de bloques de mortero con cada dosificación de agregados de plástico reciclado

Fuente: Propia.

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Fig. 1. Gránulos de plástico reciclado de PVC

Fuente: Propia.

Fig. 2. Residuos de plástico acumulados.

Fuente: Eco Innovation: Pilot and Market Replication Projects

Fig. 3. Gráfica de usos del plástico

Fuente: Use of recycled plastic in concrete: A review. R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur. (2007)

Fig. 4. Composición de residuos domésticos promedio por peso

Fuente: The Open University (2007)

Fig.5. Porcentaje de distribución del consumo de PVC en España, por sectores

Fuente: Los plásticos como materiales de construcción, M. Reyes Vigil Montaña, A. Pastoriza Martínez, I. Fernández de Piérola, 2002

Fig. 6. Gránulos de plásticos reciclados diversos

Fuente: REDAC N°11. (Revista Digital de Arquitectos de Canarias), (Febrero 2012)

Fig. 7. Fotografía Obra Hotel Westin Lima

Fuente: Constructora Graña y Montero S.A.

Fig. 8. Parábola de Fuller y Curva de Bolomey

Fuente: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real

Fig. 9. Relación entre contenido de agregados de plástico y la densidad aparente del hormigón ( $\text{kg/m}^3$ )

Fuente: Concrete Containing Plastic Aggregates, A.A. Al – Manaseer y T.R. Dalal. (1997)

Fig. 10. Relación entre contenido de agregados de plástico y los esfuerzos a compresión (MPa)

Fuente: Concrete Containing Plastic Aggregates, A.A. Al – Manaseer y T.R. Dalal, (1997)

Fig. 11. Vivienda de un piso con muros fabricados con bloques conteniendo plástico reciclado

Fuente: Aplicación de material plástico reciclado en elementos constructivos a base de cemento. R. Gaggino, R. Arguello y H. Berretta. (2007)

Fig. 12. Fotografía: Plástico reciclado de PVC

Fuente: Propia. Plástico obtenido de la recicladora de plástico Plasper.

Fig. 13. Fotografía: Plástico reciclado con contenido de carbono

Fuente: Propia. Plástico obtenido de la recicladora de plástico Plasper.

Fig. 14. Gráfica de curvas granulométricas de la arena y el plástico reciclado

Fuente: Antonia Navarro Ezquerro, Laboratorio de Materiales de la EPSEB

Fig. 15. Báscula utilizada para pesar los materiales

Fuente: Propia.

Fig. 16. Máquina amasadora con la mezcla

Fuente: Propia.

Fig. 17. Mezcla de mortero amasado

Fuente: Propia.

Fig. 18. Mortero en la mesa de sacudidas

Fuente: Propia.

Fig. 19. Molde troncónico y mesa de sacudidas

Fuente: Propia.

Fig. 20. Valor de escurrimiento de la mezcla obtenido con el pie de rey

Fuente: Propia.

Fig. 21. Probeta de 40 x 150 x 160mm

Fuente: Propia.

Fig. 22. Probetas de 40 x 40 x 150mm

Fuente: Propia.

Fig. 23. Probeta de 40 x 150 x 150mm en la mesa de sacudidas

Fuente: Propia.

Fig. 24. Bloque de hormigón de 30 cm x 15 cm x 15 cm.

Fuente: Propia.

Fig. 25. Bloquera utilizada para la producción de bloques de hormigón.

Fuente: Propia.

Fig. 26. Hormigonera utilizada para la mezcla de materiales.

Fuente: Propia.

Fig. 27. Mortero de hormigón con 25% de plástico reciclado, formando bolas.

Fuente: Propia.

Fig. 28. Llenado de material en la bloquera.

Fuente: Propia.

Fig. 29. Extracción del bloque de la máquina.

Fuente: Propia.

Fig. 30. Bloques listos para ser llevados a la cámara.

Fuente: Propia.

Fig. 31. Bloques de hormigón con 25% de plástico reciclado

Fuente: Propia.

Fig. 32. Bloques de mortero fresco con 50% de plástico reciclado

Fuente: Propia.

Fig. 33. Bloques de mortero fresco con 70% de plástico reciclado

Fuente: Propia.

Fig. 34. Bloques de mortero con 25% de plástico reciclado después de 24 horas

Fuente: Propia.

Fig. 35. Bloques de mortero con 50% de plástico reciclado después de 24 horas

Fuente: Propia.

Fig. 36. Bloques de mortero con 70% de plástico reciclado después de 24 horas

Fuente: Propia.

Fig. 37. Equipo de medida de propiedades térmicas

Fuente: Propia.

Fig. 38. Método utilizado para la medición de la conductividad térmica

Fuente: Propia.

Fig. 39. Toma de medidas de las probetas con el sensor

Fuente: Propia.

Fig. 40. Probetas secando a 50 °C en el horno para poder realizar los ensayos

Fuente: Propia.

Fig. 41. Equipos para el ensayo MOE.

Fuente: Propia.

Fig. 42. Caras de la probeta donde se realizaron los golpes.

Fuente: Propia.

Fig. 43. Equipo de ultrasonidos de marca Matest.

Fuente: Propia.

Fig. 44. Ensayo de ultrasonido para conocer el módulo de elasticidad.

Fuente: Propia.

Fig. 45. Máquina de ensayos de resistencias a flexo tracción.

Fuente: Propia.

Fig. 46. Probeta siendo ensayada a resistencias a flexo tracción.

Fuente: Propia.

Fig. 47. Probeta ensayada a resistencias a flexo tracción que ya ha fallado.

Fuente: Propia.

Fig. 48. Probetas ensayadas a flexo tracción.

Fuente: Propia.

Fig. 49. Probeta partida con dosificación de 0% de agregado de plástico reciclado de PVC.

Fuente: Propia.

Fig. 50. Probeta partida con dosificación de 10% de agregado de plástico reciclado de PVC.

Fuente: Propia.

Fig. 51. Probeta partida con dosificación de 25% de agregado de plástico reciclado de PVC.

Fuente: Propia.

Fig. 52. Probeta partida con dosificación de 50% de agregado de plástico reciclado de PVC.

Fuente: Propia.

Fig. 53. Probeta partida con dosificación de 70% de agregado de plástico reciclado de PVC.

Fuente: Propia.

Fig. 54. Probeta partida con dosificación de 25% de agregado de plástico reciclado con contenido de carbono.

Fuente: Propia.

Fig. 55. Probeta partida con dosificación de 70% de agregado de plástico reciclado con contenido de carbono.

Fuente: Propia.

Fig. 56. Máquina de ensayos de resistencias a compresión.

Fuente: Propia.

Fig. 57. Probeta siendo ensayada a resistencias a compresión.

Fuente: Propia.

Fig. 58. Probeta con dosificación de 0% de plástico reciclado de PVC fisurada por compresión.

Fuente: Propia.

Fig. 59. Probeta con dosificación de 10% de plástico reciclado de PVC fisurada por compresión.

Fuente: Propia.

Fig. 60. Probeta con dosificación de 25% de plástico reciclado de PVC fisurada por compresión.

Fuente: Propia.

Fig. 61. Probeta con dosificación de 50% de plástico reciclado de PVC fisurada por compresión.

Fuente: Propia.

Fig. 62. Probeta con dosificación de 70% de plástico reciclado de PVC fisurada por compresión.

Fuente: Propia.

Fig. 63. Probeta con dosificación de 25% de plástico reciclado con contenido de carbono fisurada por compresión.

Fuente: Propia.

Fig. 64. Probeta con dosificación de 70% de plástico reciclado con contenido de carbono fisurada por compresión.

Fuente: Propia.

Fig. 65. Probetas ensayadas a compresión.

Fuente: Propia.

Fig. 66. Equipo para el ensayo de densidad aparente y relativa e índice de porosidad.

Fuente: Propia.

Fig. 67. Campana de vacío conteniendo las muestras a ser ensayadas.

Fuente: Propia.

Fig. 68. Llenado de agua desmineralizada en la campana de vacío.

Fuente: Propia.

Fig. 69. Método para conseguir el peso hidrostático de cada pieza ensayada.

Fuente: Propia.

Fig. 70. Método para conseguir el peso saturado de cada pieza ensayada.

Fuente: Propia.

Fig. 71. Método para conseguir el peso saturado de cada pieza ensayada.

Fuente: Propia.

Fig. 72. Gráfica de densidad aparente ( $\text{kg/m}^3$ ) para las mezclas de mortero fresco.

Fuente: Propia.

Fig. 73. Gráfica de Conductividad térmica ( $\lambda$ ) ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ).

Fuente: Propia.

Fig. 74. Gráfica de Calor específico ( $c_p$ ) ( $\text{J/m}^3\cdot\text{K}$ ).

Fuente: Propia.

Fig. 75. Gráfica de Difusividad térmica ( $\alpha$ ) ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

Fuente: Propia.

Fig. 76. Gráfica mostrando los módulos de elasticidad a flexión y longitudinales (obtenidos por impacto y ultrasonido) de cada mezcla.

Fuente: Propia.

Fig. 77. Gráfica mostrando el módulo de elasticidad longitudinal de cada mezcla (MPa).

Fuente: Propia.

Fig. 78. Gráfica mostrando el módulo de elasticidad de flexión de cada mezcla (MPa).

Fuente: Propia.

Fig. 79. Gráfica mostrando las tensiones de rotura para la resistencia a flexo tracción ( $\text{N/mm}^2$ ).

Fuente: Propia.

Fig. 80. Gráfica mostrando las tensiones de rotura para la resistencia a compresión ( $\text{N/mm}^2$ ).

Fuente: Propia.

Fig. 81. Gráfica mostrando la densidad aparente y relativa.

Fuente: Propia.

Fig. 82. Gráfica mostrando el índice de porosidad (%).

Fuente: Propia.

Fig. 83. Gráfica comparando la difusividad térmica ( $m^2 / s$ ) de las mezclas de mortero con agregados de plástico y otros materiales de construcción.

Fuente: Propia.

Fig. 84. Gráfica comparando la efusividad térmica de las mezclas de mortero con agregados de plástico y otros materiales de construcción.

Fuente: Propia.

Fig. 85. Gráfica mostrando la comparación de la transmitancia térmica (U) y resistencia térmica (R).

Fuente: Propia.

Fig. 86. Esquema de un bloque macizo de mortero con agregados de plástico reciclado.

Fuente: Propia.

Fig. 87 Esquema de un bloque hueco de mortero con agregados de plástico reciclado.

Fuente: Propia.

Fig. 88. Gráfica mostrando el decrecimiento del peso (kg) de los muros de bloques macizos y huecos de mortero con agregados de plástico reciclado.

Fuente: Propia.

Fig. 89. Esquema de una teja de mortero con agregados de plástico reciclado.

Fuente: Propia.

Fig. 90. Esquema de solera hecha con mortero con agregados de plástico reciclado.

Fuente: Propia.

Fig. 91. Fotografía de fabricación de pavimento exterior hecho con hormigón y moldes de envases plásticos de huevos.

Fuente: Un Techo para vivir, P. Lorenzo Gállico, 2005

Fig. 92. Fotografía de resultado de pavimento exterior hecho con hormigón y moldes de envases plásticos de huevos.

Fuente: Un Techo para vivir, P. Lorenzo Gállico, 2005

Fig. 93. Fotografía de envases de botellas plásticas de bebidas rellenas con hormigón.

Fuente: Un Techo para vivir, P. Lorenzo Gállico, 2005

Fig. 94. Fotografía de resultado de pavimento exterior hecho con envases de botellas plásticas de bebidas.

Fuente: Un Techo para vivir, P. Lorenzo Gállico, 2005

## TÉRMINOS Y DEFINICIONES

---

### Conductividad térmica

La conductividad térmica ( $\lambda$ ) es la capacidad de un material para transferir calor. La conducción térmica es el fenómeno por el cual el calor se transporta de regiones de alta temperatura a regiones de baja temperatura dentro de un mismo material o entre diferentes cuerpos. Cuanto más alta sea la conductividad térmica de un material, más rápida será su capacidad de calentamiento y de acumulación.

Las unidades son  $W / (m \cdot K)$ , aunque también se expresa como  $kcal / (h \cdot m \cdot ^\circ C)$ .

### Calor específico

El calor específico ( $c$ ) indica la mayor o menor dificultad que presenta un material para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor. Los materiales que presenten un elevado calor específico serán buenos aislantes. Es la cantidad de calor por unidad de masa necesario para elevar la temperatura en un grado.

Por otra parte, el producto de la densidad de un material por su calor específico ( $\rho \cdot C$ ) caracteriza la inercia térmica de esa sustancia, siendo esta la capacidad de almacenamiento de energía. La relación entre el calor y el cambio de temperatura se expresa normalmente en la forma mostrada a continuación:

$$c = Q / (m \cdot \Delta T)$$

Donde;

$Q$  = Transferencia de energía en forma calorífica (flujo de calor)

$m$  = masa

$\Delta T$  = Diferencia de temperaturas

### Difusividad térmica

La difusividad térmica ( $\alpha$ ) caracteriza la rapidez con la que varía la temperatura del material ante una variación de temperatura en la superficie. Cuanto más alta sea la difusividad térmica de un material, más rápida será su capacidad de calentamiento.

Podría decirse que la difusividad térmica está relacionada a la inercia térmica. En un material de alta difusividad térmica, el calor se mueve rápidamente a través de este, porque conduce el calor rápidamente con relación a su volumen térmico. De esta manera, un material es capaz de variar su temperatura más lentamente que el medio que lo rodea. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = \lambda / (\rho \cdot c) \text{ (m}^2\text{/s)}$$

Donde;

$\lambda$  = coeficiente de conductividad térmica

$\rho$  = densidad (masa del material por unidad de volumen)

$c$  = calor específico

## Efusividad térmica

La efusividad térmica ( $b$ ) es una magnitud que mide la capacidad del material para almacenar y absorber el calor. Sus unidades son  $J/m^2 \cdot ^\circ C \cdot \sqrt{s}$ .

Cuanto más alta sea la efusividad térmica de un material, más rápida será su capacidad de acumulación.

$$b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda}$$

Donde;

$b$  = Efusividad térmica

$\rho$  = Densidad

$c$  = Calor específico

$\lambda$  = Coeficiente de conductividad térmica

Son materiales de alta conductividad, difusividad y efusividad térmicas los metales y las piedras.

Por el contrario, son materiales de baja conductividad, difusividad y efusividad térmicas los aislantes y las maderas.

## Resistencia térmica

La resistencia térmica ( $R$ ) es la capacidad de un material para resistir el paso de flujo de calor. También podemos definirla como la oposición al paso del calor que presenta una capa de cierto espesor ( $e$ ) de un material aislante.

Es inversamente proporcional a la conductividad térmica y aumenta con el espesor de material.

$$R = e / \lambda$$

## Transmitancia térmica

La transmitancia térmica ( $U$ ) es la cantidad de energía que atraviesa una unidad de superficie de un elemento constructivo de caras paralelas, debe haber un gradiente térmico entre estas caras. El concepto de transmitancia térmica se usa en construcción para el cálculo de los aislamientos y pérdidas energéticas. Se debe determinar la cantidad de energía que hay que suministrar a los espacios habitados en la unidad de tiempo (potencia) para mantener una determinada temperatura (la de confort) en una determinada diferencia con la temperatura exterior.

Es el inverso a la resistencia térmica. ( $U = 1 / R$ ) Su expresión matemática es:

$$U = W / S \cdot K$$

Donde;

$W$  = Potencia en vatios

$S$  = Superficie en metros cuadrados

$K$  = Diferencia de temperaturas en Kelvin.

## Peso hidrostático

Es el peso inundado de un material. Se consigue con una balanza hidrostática, al sumergir el material en el agua, sin que toque las paredes del recipiente que la contiene. Al inundar los poros y huecos de un material, y conociendo el peso seco de este, se puede conocer la densidad relativa, aparente y el índice de porosidad.

$$D_r = P_{sec} / (P_{hidrostat} - (P_{sat} - P_{sec}))$$

$$D_{ap} = P_{sec} / P_{hidrostat}$$

$$\text{Índice porosidad} = (P_{sat} - P_{sec}) / P_{hidrostat}$$

### Peso saturado

Es el peso del material húmedo cuando está saturado. Se retira del agua (de la balanza hidrostática), se le pasa un paño húmedo y se pesa en la báscula. Con esto, el peso seco y el peso hidrostático se pueden conseguir la densidad relativa y el índice de porosidad. Al conocer el peso del material húmedo y obtener la diferencia entre este y el peso seco, se puede obtener el peso del agua en el material y luego se puede restar del peso hidrostático para dividir el peso seco entre este resultado, y así, conseguir la densidad relativa. Para conseguir el índice de porosidad la diferencia entre el peso saturado y el peso seco es divide entre el peso hidrostático.

### Peso seco

Es el peso que queda de un material luego de ser introducido a un horno, donde se extrae toda el agua posible a través de un calentamiento hecho en condiciones de laboratorio.

### Densidad relativa

La densidad relativa de un material es la relación entre la masa y el volumen que ocupa dicho material, descontando el volumen de su porosidad. No tiene unidades. Es una relación entre la densidad de un material con la densidad de otro que se toma como referencia, o densidad absoluta.

$$\rho_r = \rho / \rho_{ab}; \rho_r = m / V_r$$

Donde;

$\rho_r$  = Densidad relativa

$\rho$  = Densidad del material

$\rho_{ab}$  = Densidad de referencia o absoluta

m = masa

$V_r$  = Volumen relativo

La densidad absoluta es la magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen real de un material. Su unidad es kilogramo por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) o también  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

$$\rho_{ab} = m / V_R$$

### Densidad aparente

La densidad aparente de un material es la relación entre la masa y el volumen que ocupa dicho material, sin descontar el volumen que ocupan sus poros. Es una magnitud que se aplica a los materiales porosos, los cuales son heterogéneos y poseen espacios interiores conteniendo aire.

En el caso de un material mezclado con aire se tiene:

$$\rho_{ap} = m_{ap} / V_{ap} = (m_R + m_{aire}) / (V_R + V_{aire})$$

Donde;

$\rho_{ap}$  = Densidad aparente

$m_{ap}$  = Masa aparente

$V_{ap}$  = Volumen aparente

$m_R$  = Masa real

$V_R$  = Volumen real

La densidad aparente de un material depende de su compactación, no es una propiedad intrínseca de este.

## Índice de porosidad

Es el índice de huecos, índice de poros o relación de vacíos. Es la relación volumétrica de huecos respecto a la parte sólida. Es la diferencia entre el peso saturado y el peso seco, dividido entre el peso hidrostático. Se muestra como un porcentaje.

$$P = h_t / V_{ap}$$

$V_r$  =Volumen relativo (parte sólida más huecos cerrados)

$D_{ap}$  = Densidad aparente

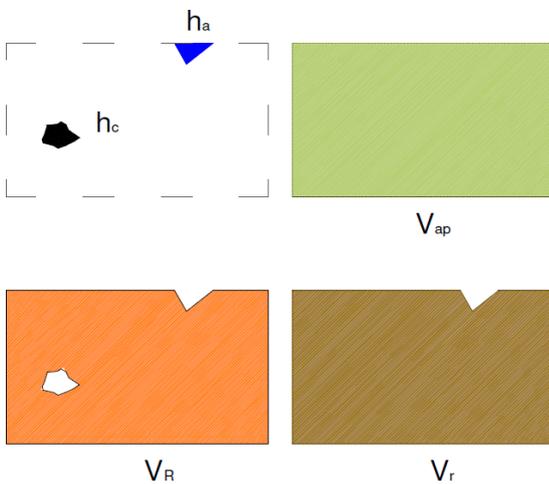
$D_R$  = Densidad real (parte sólida)

$D_r$  =Densidad relativa (parte sólida más huecos cerrados)

$m_s$  = masa seca

$m_{sat}$  = masa saturada

Esquema 1. Volumen aparente, real y relativo.



$$V_r = V_R + h_c = V_{ap} - h_a; V_{ap} = V_R + h_a + h_c$$

Fuente: Universidad de Alicante, Prácticas de Materiales de Construcción, I.T. obras Públicas, C. García Andreu, J.M. Saval Pérez, F. Baeza Brotons, A.J.Tenza Abril, 2009

$h_c$  = Volumen de huecos cerrados o inaccesibles

$h_a$  = Volumen de huecos accesibles

$h_t$  = Volumen de huecos totales

$V_{ap}$  =Volumen aparente (envolvente del pétreo)

$V_R$  =Volumen real (parte sólida)

## 1. INTRODUCCIÓN

---

### 1.1. Definición básica del proyecto

En el sector constructivo la demanda para el hormigón crece cada vez más, ya que es un material resistente a los esfuerzos de compresión, y cuando es armado, también a resistencias de flexión y cortantes. Mundialmente probablemente sea el material constructivo más utilizado en las edificaciones. Un inconveniente es que es muy pesado, su peso específico es de 2400 kg/m<sup>3</sup>, lo cual puede ser problemático en algunos casos. {{1 Weigler,Helmut 1974}} Es un material, en principio, de bajo impacto ambiental, pero el problema está en su peso. Al ser un material de mucha densidad y peso que se utiliza en gran cantidad, su impacto ambiental crece notablemente.

¿Pero qué pasaría si el peso de este material disminuyera? Los hormigones ligeros son conocidos desde hace muchos años, y al ser menos pesados que el hormigón convencional el impacto ambiental producido puede ser menor. En la mezcla de hormigón se sustituye el árido común por materiales de baja densidad como por ejemplo la cerámica expandida porosa, y otros ejemplos que se verán más adelante. Dependiendo de la densidad del hormigón ligero, puede ser estructural o no estructural. Si es de muy baja densidad, alrededor de 600kg/m<sup>3</sup>, no puede soportar cargas y es utilizado para pavimentos o morteros. Alrededor de 1400kg/m<sup>3</sup> de densidad en adelante el hormigón ligero ya puede funcionar como elemento estructural. {{1

Weigler,Helmut 1974}} Comparado con el hormigón convencional, (de 2400kg/m<sup>3</sup>), este hormigón ligero decrece notablemente su densidad y peso, pudiendo tener la misma resistencia y aligerando sus elementos en el edificio.

Con un hormigón aligerado se reduce el impacto ambiental, al reducir su peso y la cantidad de mezcla utilizada. Los materiales que se añaden a los hormigones aligerados son principalmente el vidrio, cerámica, la escoria de carbón, piedras de baja densidad como la piedra pómez, arcilla expandida, entre otros materiales. En el caso de utilizar áridos reciclados, las ventajas medioambientales son obvias.

Por otro lado, el plástico es un material que usamos en abundancia, y que luego de ser reciclado pierde muchas de sus propiedades y la calidad del material disminuye. El plástico es un material resistente a la humedad y al deterioro, es ligero y durable, es un material que perdura. Es una buena alternativa que podría usarse como agregado en hormigones ligeros.

La cantidad de residuos plásticos que Europa genera – del cual una parte es incinerada – es significativa y continúa en alza. Estos residuos luego se convierten en relleno, van a parar a los vertederos o son incinerados y tan solo un menor porcentaje es reciclado. En vez de desecharlo, sin utilidad alguna, produciendo degradación del entorno y lanzando emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente, este plástico podría ser reciclado y

convertirse en agregados para el hormigón o el mortero, ya sea estructural o no. Así se le daría un uso más al plástico reciclado, incentivando su utilización, y las recicladoras y los gobiernos podrían promover su uso, para poder aprovecharlo mejor.

El procedimiento de elaboración del hormigón ligero con plástico reciclado, es similar al de un hormigón convencional, pero reemplazando un porcentaje de los áridos pétreos por este plástico reciclado triturado. En esta mezcla se utiliza menor cantidad de agua, ya que estos agregados de plástico no la absorben como lo hacen otros materiales de alta porosidad.

Este plástico reciclado puede funcionar como árido en el hormigón y en el mortero, y tal vez también como carga ligera. El objetivo de esta investigación es estudiar el comportamiento del mortero con agregados de gránulos de plástico reciclado para lograr conocer si puede o no funcionar para utilizarse en elementos estructurales, o bien para muros de cerramiento no estructurales, pavimentos o morteros, e investigar si se puede disminuir el impacto ambiental, sin perjudicar estas utilidades, y que sirva además como aislamiento térmico.

*Fig. 1. Gránulos de plástico reciclado de PVC*



Fuente: Propia.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Como se ha mencionado anteriormente, dentro de las finalidades de esta investigación, están el estudio del mortero aligerado con agregado de plástico reciclado de PVC, para poder introducir este material y que pueda funcionar también como carga para el hormigón, de manera estructural, o que tenga otros usos, como por ejemplo utilizarlo en bloques para la composición de muros no estructurales, y así poder aportar una alternativa a otras tecnologías de construcción que consumen recursos no renovables o que producen un alto impacto ambiental.

Por tanto, se pretende estudiar resistencias y densidades de este material, para que así pueda servir para aligerar los elementos constructivos en una edificación. Se pretende además estudiar la conductividad térmica del material, para saber si puede brindar un buen aislamiento térmico en la vivienda, de tal manera que se le da un valor agregado a este material.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudio comparativo físico y mecánico del mortero convencional con este mortero mejorado con agregados de plástico reciclado. Comparar las distintas proporciones de mezcla, para determinar las propiedades de cada tipo de mezcla de hormigón resultante:

Reología

Densidad y porosidad

Peso  
Módulo de Young  
Resistencia a compresión  
Resistencia a flexo tracción  
Conductividad térmica

- Definir los usos posibles de estos tipos de hormigón ligero en la construcción..
- Analizar el impacto ambiental que estos morteros – según cada dosificación – producirían, en comparación con el mortero convencional.

### **1.3. Alcances y límites de la investigación**

Se espera encontrar una combinación entre mezcla de cemento y plástico, en donde se utilizaría la menor cantidad de áridos convencionales y la mayor de áridos de plástico, sin perjudicar o disminuir en gran cantidad las características mecánicas del hormigón, disminuyendo su peso y densidad, y a su vez, dándole una función como aislante térmico para darle un valor agregado.

Se trabajará en una campaña experimental, creándose ocho probetas para cada dosificación. Las dosificaciones a utilizar de los gránulos de plástico reciclado serán de 10%, 25%, 50% y 70% de plástico reciclado de PVC y de 25% y 70% de plástico reciclado con contenido de carbono. Este plástico reemplazará parte de la arena, en cuanto a volumen. Se crearán prototipos de bloques de mortero aligerado a escala real, para comprobar que se pueden construir. Estos bloques tendrán contenidos de plástico de 25%, 50% y 70% de plástico reciclado de PVC. No alcanza la construcción de un muro

de bloques a escala real ya que esto necesitaría una mayor cantidad de tiempo y excedería los límites económicos. El ratio de mortero a utilizar en todas las probetas y bloques será de 1:3, y se irá variando el agua según la necesidad de cada dosificación, probando entre 0.48 y 0.55.

El factor económico para la construcción de este material no será tomado en cuenta, para poder centrar la investigación plenamente en los objetivos planteados, pero se entiende que los costos de este mortero se reducirían debido al menor uso de mezcla y el cambio de áridos naturales o artificiales por el plástico reciclado.

### **1.4. Metodología de trabajo**

#### **1.4.1. Recopilación Bibliográfica**

El camino a seguir para la realización de este trabajo fue primero recopilar información y hacer una exploración bibliográfica, para poder determinar el Estado del Arte sobre este tema y para estudiar las metodologías hechas en otras campañas experimentales y observar sus resultados. De esta manera se podrá anticipar algunos de ellos y tener una hipótesis más clara y certera. Con esta exploración, se pudo observar que si bien se han realizado algunas investigaciones y experimentaciones con hormigones ligeros con agregados de plástico reciclado, (añadido a la mezcla como árido o mezclado de manera química) la documentación que existe no es extensa, y no se ha encontrado esta información para morteros. Dentro de la información encontrada se han visto ensayos hechos

para resistencias de compresión y flexo tracción, de densidades en algunos casos y de conductividad térmica no se ha visto. Entonces se puede continuar a partir de esta información para determinar las resistencias de las probetas a desarrollar y complementarlo con otras características interesantes como lo es la conductividad térmica, la cual casi no se ha estudiado aún.

Existen algunas construcciones de hormigón con agregados de polímero reciclado, como por ejemplo el hormigón utilizado en las estaciones de Metro de Granada, el cual posee una mezcla con caucho reciclado de neumáticos, pero estos casos son muy escasos.

#### **1.4.2. Campaña Experimental**

La segunda parte de la metodología consistirá en unificar toda la información encontrada relevante y llevar a cabo los ensayos correspondientes teniendo las experiencias y conocimientos anteriores.

Se compararán las características de los morteros con distintos porcentajes de contenido de plástico reciclado, los mencionados anteriormente, y se compararán también con una muestra de mortero convencional, para conocer sus ventajas, desventajas, los comportamientos en cuanto a resistencias y la conductividad térmica. Esta parte experimental será llevada a cabo en el laboratorio de materiales de la Escuela Politécnica Superior de Edificaciones de Barcelona, (EPSEB).

Con los ensayos realizados se podrá ver si sirven para soportar cargas o no, y si

podrían utilizarse para bloques para muros de cerramiento o para soleras o recubrimientos.

Los bloques de mortero a construirse, con las dosificaciones mencionadas anteriormente, a escala real, se fabricarán con una bloquera, CINVARAM, proporcionada por la EPSEB, para averiguar si realmente se pueden construir.

Se comparará la reducción del impacto ambiental según la dosificación y se llegará a conclusiones acerca de este material. Así, se podría integrar el plástico reciclado a un nuevo ciclo, el del hormigón, que posee un periodo de vida más prolongado y se contribuiría a que se recicle más, al poder aprovechar este material de otras formas, además de las ya existentes, dándole mayor valor al plástico para que sea reciclado.

### **1.5. Estructura de la Tesina**

#### Capítulo 1. Introducción

Es una breve descripción del tema principal. Se presenta el caso del plástico en la actualidad, del plástico reciclado y su forma de reutilización en la construcción como parte de la mezcla del hormigón ligero, como árido o como carga ligera. Se plantean los objetivos y los alcances de la investigación, y se determina la metodología de trabajo a seguir.

#### Capítulo 2. Teoría

Se analiza la situación actual del plástico, sus usos y los tipos de plástico que sirven para estos. Se estudia lo que es

desechado y lo que es reciclado, y los métodos de ambos. Se hace un estudio cualitativo y cuantitativo de ambos para determinar el problema de los desechos, principalmente en Europa.

Una vez planteado este problema, se introduce el tema del hormigón. Se estudia el hormigón convencional, y lo que posteriormente se inventó, el hormigón ligero, y también los áridos que existen para aligerarlo, naturales y artificiales. Posteriormente se plantea la utilización del plástico reciclado para reemplazar un porcentaje del árido, en volumen, de tal manera que se disminuye la densidad y el peso del hormigón, decreciendo también este alto impacto ambiental que posee y así al mismo tiempo se le dan más usos al plástico reciclado.

Luego se hace una exploración de los últimos estudios que se han hecho acerca de la utilización del plástico reciclado. Se centra esta exploración en el uso del plástico en la construcción, como áridos y carga ligera para el hormigón. Se han realizado estudios en Europa y países como Estados Unidos, Argentina, Perú, Chile, entre otros. Se encuentran entre los documentos estudios hechos con distintos tipos de plástico, y mezclas hechas también de manera química, como aditivos para el hormigón. Existen algunas investigaciones en donde se han realizado pruebas de resistencia para el hormigón con agregado de plástico, las cuales se estudiarán en este trabajo para tener una idea más acertada de los resultados que se podrán obtener. Se complementará con el estudio de conductividad térmica, que no se ha estudiado aún. Basándose en la

documentación encontrada en el Estado del Arte, se plantea una hipótesis que luego se comparará con los resultados obtenidos y el análisis hecho, luego de la campaña experimental.

### Capítulo 3. Plan de ensayos

Gracias al estudio previo del Estado del Arte, se puede diseñar esta campaña experimental con los conocimientos de otras experimentaciones hechas y resultados vistos. Se plantean los pasos a seguir y las características que debe tener el mortero aligerado con agregados de plástico reciclado. Se escoge el tipo de probeta a usar y los procedimientos de ensayo a seguir.

Luego se fabricarán modelos escala uno en uno, de bloques de mortero, para poder saber si efectivamente se pueden crear bloques con estas mezclas de cemento, arena y plástico reciclado.

### Capítulo 4. Resultados y análisis

Se muestran los resultados obtenidos en los ensayos que se definieron en la campaña experimental. Se compararán las características físicas y mecánicas resultantes de las probetas de mortero ligero con las distintas dosificaciones de plástico reciclado y con el mortero convencional.

Las conclusiones hechas en este capítulo serán sobre los resultados de la campaña experimental, las cuales se plantearán según los porcentajes de plástico reciclado en cada probeta.

## Capítulo 5. Propuestas

Se plantean propuestas de uso para los tipos de mortero resultante de la campaña experimental. Dependiendo de las características que tengan estos, se presentarán como materiales que soportan carga, para cierta cantidad de niveles en un edificio bajo o como muros de cerramiento, y los casos en los que la resistencia es mínima, donde hay un alto porcentaje de plástico, se presentarán como morteros para recubrimientos, soleras, entre otros usos.

## Capítulo 6. Conclusión final

En este capítulo se obtiene una visión global de la problemática generada en la investigación, desde la definición del problema principal del plástico y del hormigón, las hipótesis planteadas para el desarrollo de la parte metodológica, los resultados obtenidos y el procesamiento de estos resultados. Según las características del material se abre un camino de estudio, para complementar lo que ya existe en la actualidad, que es la propuesta de bloques de mortero aligerado con agregados de plástico reciclado que además ofrecen un buen aislamiento térmico. Se determina si es válido este cambio de mezcla por plástico, lo que se gana con todo esto, con respecto a lo que se pierde (resistencias a compresión y flexo tracción) y qué tanto mejora el impacto ambiental del hormigón.

## Capítulo 7. Bibliografía

Se muestra la relación de todos los documentos encontrados para este estudio como fuente bibliográfica. Se clasifica en dos partes; la bibliografía general acerca del tema del plástico y del hormigón, y la bibliografía específica sobre el tema, investigaciones hechas sobre el hormigón con agregados de plástico.

*Fig. 2. Residuos de plástico acumulados.*



*Fuente: Eco Innovation: Pilot and Market Replication Projects*

## 2. TEORÍA

### 2.1. Planteamiento del tema

#### 2.1.1. Situación y usos del plástico

La situación actual del plástico, hoy en día, es que el consumo anual de este material se ha incrementado desde aproximadamente 5 millones de toneladas en el año 1950 a casi 245 millones en el año 2006. {{6 Plastics Europe, 2008}}. El aumento anual en esta sociedad es de aproximadamente 4%. Producimos y usamos 20 veces más plástico hoy en día que hace 50 años. El consumo de plásticos en España en el 2000 fue de 2 millones de toneladas. {{7 J. M. Arandes, J. Bilbao, D. López Valerio, 2004}} La tecnología para la producción del plástico ha ido de la mano con el consumo de este, pero no con su reciclado, esto es algo más reciente.

En la *Tabla 1* se puede observar la cantidad de residuos de plástico generado en Europa, Reino Unido y Estados Unidos. Más

de un tercio de los residuos de plástico viene de embalaje, y un cuarto del total es usado en la construcción. (*WRAP, Market Situation Report, Autumn 2007 – Realising the Value of Recovered Plastics, 2007*) De todos los residuos generados, más del 80% es utilizado como rellenos o llevado a vertederos, el 8% es incinerado y se estima que tan solo el 7% es reciclado. {{11 Siddique, R. 2008}} Europa consume alrededor del 25% de plástico producido mundialmente, que equivale a 60 millones de toneladas al año.

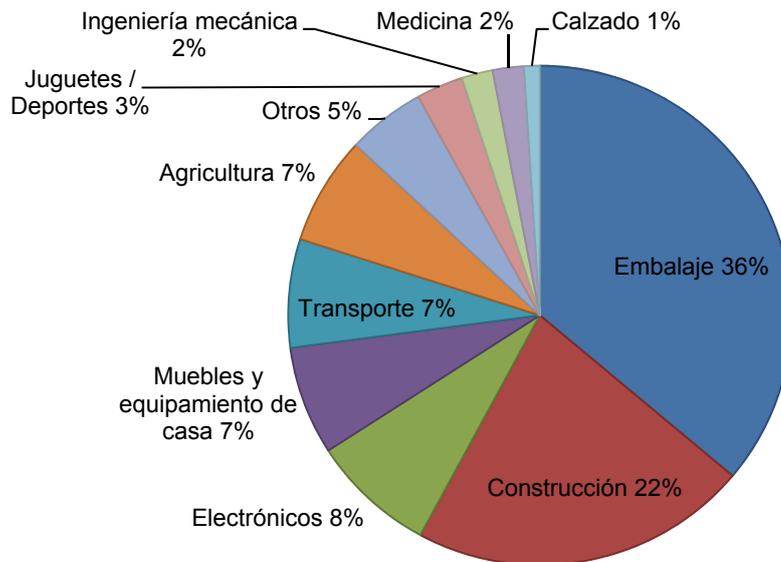
En la *Figura 3* se pueden observar los usos que tiene el plástico en la ciudad. El conteo se realizó en el Reino Unido. El mayor componente en los desechos del plástico es el polietileno de baja densidad (LDPE), con 23% del total, seguido por el polietileno de alta densidad con 17,3%, polipropileno 18,5%, poliestireno 12,3%, clórido de polivinilo 10,7%, polietileno tereftalato 8,5% y otros tipos 9,7% (Asociación de Industria de plástico en Europa, 2004). {{11 Siddique, R. 2008}}

*Tabla 1. Datos de consume y residuos de plástico en toneladas*

		Cantidad (millones)	Referencia
Reino Unido	Consumo	4,7	www.wasteonline.org.uk (2001)
	Residuos	3,0	www.wasteonline.org.uk (2001)
Europa del Este	Consumo	43,5	APME (2004)
EE. UU.	Consumo	26,7	EPA (2003)
	Residuos	11,0	EPA (2003)

Fuente: *Waste Management: "Use of recycled plastic in concrete: A review"* (R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur)

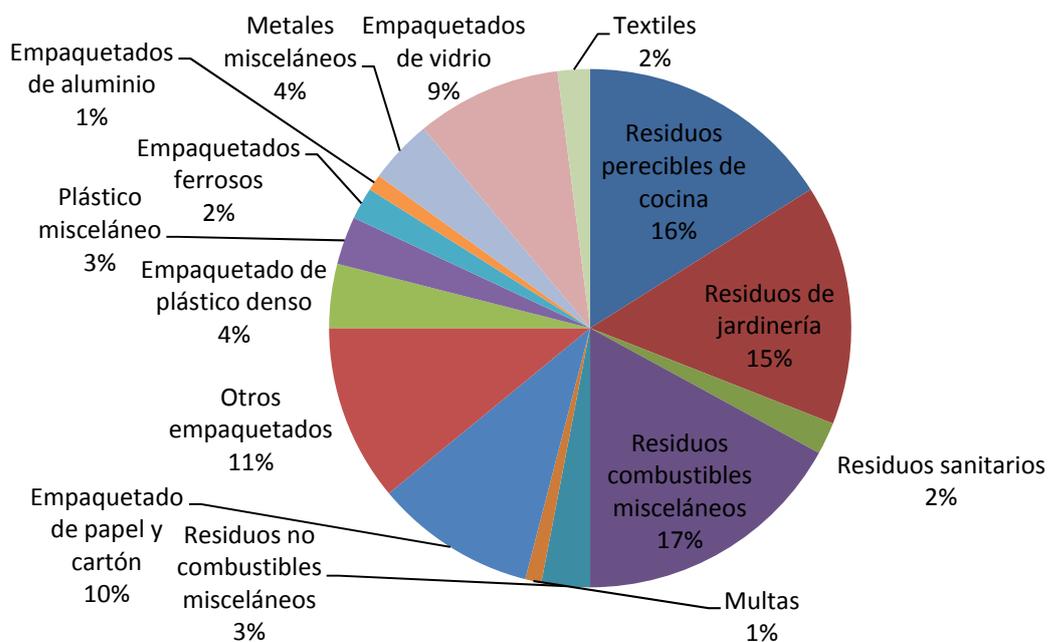
Fig. 3. Gráfica de usos del plástico



Fuente: Use of recycled plastic in concrete: A review. R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur. (1997)

Gran cantidad del plástico desechado proviene de las viviendas. Entre los desechos domésticos, el 7% del total en peso es plástico (Fig. 4). Los desechos domésticos generados llegan a 3 millones de toneladas al año, siendo 1.4 millones empaquetado de plásticos varios.

Fig. 4. Composición de residuos domésticos promedio por peso



Fuente: The Open University (2007)

El crecimiento considerable del consumo de plástico se debe a las características beneficiosas de este. Posee una gran versatilidad para hacerse a medida según cada requerimiento específico, es un material muy ligero y muy durable, no se degrada con facilidad. Es resistente a muchos químicos, al agua y al impacto. Además el plástico posee propiedades higiénicas para el embalaje de comida. Otra característica, que interesará en esta investigación, es que posee muy buenas propiedades de aislamiento térmico y eléctrico. El plástico además tiene bajos costos de producción.

En la actualidad, se han desarrollado nuevos plásticos, que se degradan más rápidamente que el plástico convencional. Se degrada bajo ciertas condiciones o después de un periodo de tiempo. Los dos tipos existentes son: el plástico biodegradable, el cual contiene un pequeño porcentaje de material que no es a base de aceite, como el almidón de maíz, y el plástico fotodegradable, el cual se deteriora con la luz del sol. Estos plásticos son menos estables que el plástico convencional. El primero no se puede reciclar, así que siempre termina en rellenos o vertederos, y el segundo es confundido con el resto del plástico y termina teniendo el mismo destino, siendo enterrado en los rellenos – con lo cual se evita su degradación, al no darle el sol –. {{6 Plastics Europe, 2008}}

El incremento de plásticos biodegradables en los rellenos subterráneos con el tiempo produce emisiones de metano, el cual es 23 veces más potente como gas de

efecto invernadero que el dióxido de carbono, y su presencia en la atmósfera ha ido incrementando rápidamente en estos últimos años. {{6 Plastics Europe, 2008}}

La producción de plástico genera impactos ambientales grandes, y requiere una gran cantidad de recursos, como los combustibles fósiles. Su manufactura además requiere otros recursos como el agua y produce desperdicios y emisiones de dióxido de carbono. Su producción involucra el uso de químicos, muchos de ellos nocivos para la salud y el medio ambiente, usados en los colorantes o estabilizadores.

Los desechos de plástico también generan un impacto ambiental importante. Este material, debido a sus características beneficiosas, también son perjudiciales, ya que toma mucho tiempo en degradarse. Es enviado como relleno al subsuelo y permanece allí muchas decenas de años, acumulándose y creciendo cada vez más. También son enviados a depósitos de desechos, lo cual genera la degradación del paisaje. Un ejemplo del paradero final del plástico, es que un promedio de uso doméstico de botellas de plástico al año es de 500 botellas, y de esta cantidad, solo el 26% es reciclado, es decir 130 botellas. {{6 Plastics Europe, 2008}}

El plástico desechado que es incinerado, genera contaminación y emisiones de dióxido de carbono que van a la atmósfera. Además, durante la incineración se producen cenizas contaminantes que deben ser desechadas. Estas cenizas no pueden ser enviadas a rellenos o vertederos, porque producen contaminación de suelos y agua subterránea,

debido al contenido de plomo y cadmio que poseen. Los métodos para proteger el agua y el suelo de esto son muy costosos y no siempre efectivos, desde un punto de vista medioambiental, por lo que no es algo que pueda realizarse con facilidad. {{12 R. Siddique, 2008}}

El plástico no solo es perjudicial en las ciudades, y en la degradación del paisaje, si no que tiene un gran impacto sobre la vida animal, especialmente en los océanos, donde el 90% de los desperdicios encontrados navegando sin rumbo son plástico. Esto causa la muerte de muchas aves marinas y peces. Además, este plástico se degrada con el agua salada, soltando partículas que forman químicos tóxicos, siendo ingeridos por muchos animales, causando su muerte.

### 2.1.2. Reciclaje de plástico

El reciclaje de plástico permite alargar su ciclo de vida, lo que es favorable para el mortero aligerado ya que lo inserta en su ciclo consiguiendo tener un último uso como árido y carga, y además le proporciona al mortero mejores propiedades.

Un hecho importante acerca del reciclaje es que la energía usada para reciclar botellas plásticas es ocho veces menos que la energía requerida para crear una botella nueva. Por cada botella reciclada, este ahorro de energía es equivalente a la energía para encender una lámpara de 60W por seis horas. Si se ve esto en cantidades de botellas al año, las cifras son alarmantes {{6 Plastics Europe, 2008}}. Esto quiere decir que al reciclar se consume menor cantidad de energía y si se le da un nuevo uso en la

construcción esto resulta mejor. Con el reciclaje además se reducen las emisiones de dióxido de carbono, óxido de nitrógeno y dióxido de sulfuro, y se reduce la cantidad de plástico que va a parar a los rellenos o vertederos y que es incinerado.

Existen dos tipos de reciclaje de plástico:

#### *Reciclaje mecánico:*

Esto se refiere a los procesos que involucran derretir, triturar o granular los residuos de plástico. Se deben separar por colores y tipos de polímero. Estos son moldeados en una nueva forma luego de ser derretidos, o son derretidos luego de ser triturados o granulados.

#### *Reciclaje químico:*

En este tipo de reciclaje se rompen las cadenas de polímeros en el plástico, pudiendo ser utilizado luego en las refinerías y en la producción química. Este reciclaje es más tolerante a las impurezas que el reciclaje mecánico, pero necesita de grandes cantidades de plástico desechado para poderse procesar para que sea económicamente viable.

El plástico, al ser derivados del petróleo, el cual es una materia prima agotable y muy valorada, debería ser rescatado y ser usado en muchos más sectores, y al tener mayor demanda, sería reciclado en mayor cantidad, y habría mayor conciencia de reciclaje en la sociedad.

El tema es que los envases plásticos no son retornables, como ocurre con los envases de vidrio, además al ser de tan baja densidad, los costos de transporte se elevan,

teniendo que ser cortados o rotos para poder ser transportados. Además, el plástico se debe seleccionar por tipos, no se pueden mezclar todos los plásticos porque no son compatibles ya que no es un material homogéneo, como el aluminio o el papel, y cada componente es una mezcla de desperdicios con diferentes comportamientos frente a la fundición, la reología y la estabilidad térmica, cada tipo tiene diferentes composiciones y puntos de fusión.

Algo que aún limita que el reciclaje sea más eficiente, para hacer productos útiles es la contaminación del plástico con otros materiales como la suciedad y metales, que pueden dañar la maquinaria utilizada para reprocesar estos desechos de plástico. Algunos incluso son casi imposibles de recuperar, al menos hoy en día, como el caso

del plástico tipo film, el cual es desechado en grandes cantidades en las viviendas. Otros plásticos, luego que han sido usados para envases de comida y embalajes, pueden ser de buena calidad, pero por razones sanitarias no pueden volver a ser usados para lo mismo. En el caso de los termoplásticos – los cuales pueden ser reciclados muchas veces – las prestaciones van descendiendo conforme los ciclos de reciclaje van sucediendo, pierden sus propiedades.

Otro factor que limita el reciclaje es que los desechos plásticos tienen una baja densidad, por lo que deben ser compactados, ya que de otra forma producirían muchos gastos de transporte. En la Tabla 2 se pueden conocer algunos usos del plástico nuevo y reciclado, dependiendo de su procedencia.

Tabla 2. Usos del plástico nuevo y plástico reciclado

Nombre del plástico	Descripción	Usos para el plástico nuevo	Usos para el plástico reciclado
Poliétileno tereftalato (PET)	Transparente y resistente	Botellas de agua, bolsos de dormir, almohadas, fibras textiles.	Botellas de detergente, film para empaquetar, fibra de alfombras.
Poliétileno de alta densidad (DPE)	Muy común. Usualmente blanco o de color.	Bolsas de compras y de nevera. Botellas de leche y shampoo.	Botellas de detergente, bolsas de basura, tuberías.
Cloruro de polivinilo (UPVC)	Plástico duro y rígido.	Botellas de zumo, tuberías de desagüe.	Botellas de detergente, tuberías de desagüe.
Cloruro de polivinilo (PPVC)	Plástico flexible y elástico.	Mangueras, suelas de zapato, bolsas de sangre, tuberías.	Núcleo interior de manguera, suelos industriales.
Poliétileno de baja densidad (LDPE)	Plástico suave y flexible	Tapas de envases de helado, bolsas de basura, tachos de basura.	Films para construcción, embalaje y bolsas para plantas.
Polipropileno (PP)	Plástico duro y flexible.	Envases de helado, bolsas para patatas, cañitas para beber, loncheras rígidas.	Cajas de reciclaje, tachos de desechos.
Poliestireno (PS)	Plástico rígido y quebradizo, puede ser claro y vidrioso.	Envases de yogurt, acrílicos e imitación de vidrio.	Ganchos de ropa, accesorios de oficina, cajas de CD's.
Poliestireno expandido (EPS)	Espumado, ligero, aislante y absorbente de energía.	Vasos para bebidas calientes, envases de comida para llevar, bandejas de carne, empaquetado.	

Fuente: Recycling and Resource Recovery Council, 1994

Plástico PVC (Cloruro de polivinilo):

Este es un polímero termoplástico y una resina que resulta de la polimerización del cloruro de vinilo o cloroetano. En la industria existen dos tipos de PVC: el rígido, utilizado para envases, ventanas y tuberías; y el flexible, para cables, juguetes, calzados, recubrimientos y pavimentos. Este es usado ampliamente en el sector de la construcción, seguido por los sectores de envases y agricultura (Fig. 5). Al ser un material estable e inerte, es usado también en los casos donde se requiere higiene, como tuberías de agua potable y bolsas para sangre.

Este plástico tiene muy buena resistencia, puede durar más de 60 años sin degradarse. También es resistente eléctrica y térmicamente. Además posee una baja densidad (1.4 gr/cm<sup>3</sup>) y buena resistencia mecánica y al impacto. Es dúctil y combustible, y debido a la presencia de cloro, este plástico no se quema con facilidad, presenta una baja inflamabilidad, muy útil para recubrimientos en la construcción. Sin embargo, es señalado como un producto

tóxico, (es el único que posee cloro), lo que lo convierte en un material nocivo que no puede permanecer en el ambiente, y es mejor que sea reciclado y reutilizado. Este representa el 5% de todos los plásticos. {{9 M. Reyes, 2002}}.

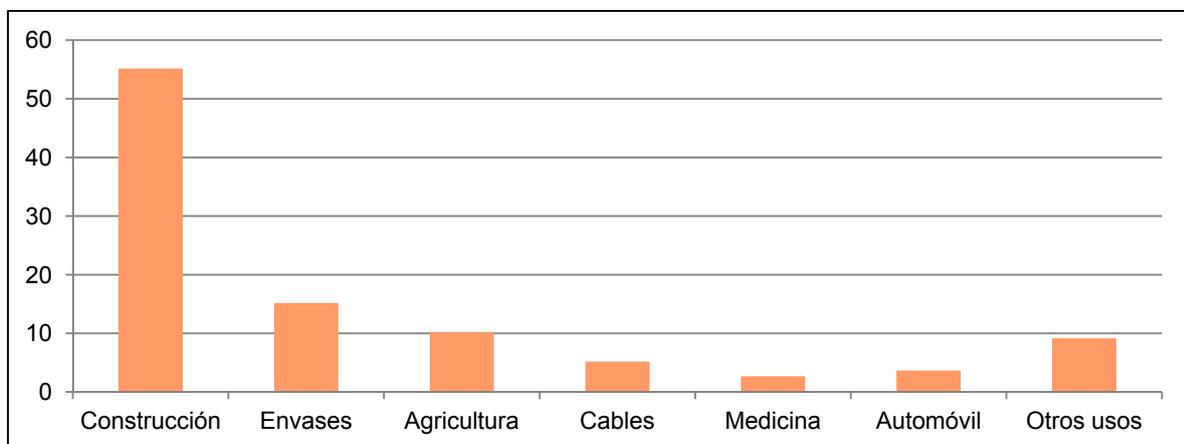
Algunas investigaciones indican que los residuos del plástico pueden ser reciclados al aplicarse en el ámbito de la construcción. {{15 R. Gaggino, 2007}}. Estos se añaden a la mezcla de hormigón y se pueden encontrar como fibras o gránulos.

Fig. 6. Gránulos de plásticos reciclados diversos



Fuente: REDAC N°11. (Febrero 2012)

Fig.5. Porcentaje de distribución del consumo de PVC en España, por sectores



Fuente: Los plásticos como materiales de construcción, M. Reyes Vigil Montaña, A. Pastoriza Martínez, I. Fernández de Piérola, 2002

### 2.1.3. El hormigón y su impacto ambiental

El hormigón podría ser un material muy adecuado para una construcción más sostenible, ya que este proporciona inercia térmica y reduce la demanda energética de construcción, y por ende, el consumo de energía que realizará el usuario durante la vida útil de este. Proporciona una vida útil muy larga, y en esta, una elevada resistencia al fuego, evitando daños colaterales y brindando mayor seguridad. El hormigón también ofrece aislamiento acústico hasta cierta medida, suficiente como para asegurar el confort del usuario, por lo que no se necesitan materiales adicionales, (para un uso convencional de vivienda u oficina). Finalmente, el hormigón es reciclable, y puede formar parte de nuevas construcciones como árido, cerrando de esta manera su ciclo. Una mejora que podría hacerse para que este material sea más sostenible, es reducir su peso, ya que posee una densidad muy alta a comparación de otros materiales. Su impacto ambiental es alto debido a esto. Se podría reemplazar el árido pesado, por otros materiales más ligeros y productos de reciclaje, para de tal forma evitar la extracción en canteras, que resultan en la pérdida de suelo superficial y en la degradación del paisaje. Por otro lado, al reducir la densidad del hormigón, se reduce de igual manera su inercia térmica, es por esto que se debe tener en consideración.

El hormigón común contiene aproximadamente 80% de agregados en su masa. Esto quiere decir que se consume mucha arena, grava y roca triturada, entre otros áridos, a una velocidad de 10 a 11 billones de toneladas por año. Asimismo, se

emplean grandes cantidades de agua para la mezcla de los materiales, especialmente porque los agregados finos como la arena absorben mucha agua.

Algo que podría hacerse para reducir este impacto ambiental es reemplazar los áridos naturales – que son utilizados de forma masiva y se requieren altísimas cantidades, al ser uno de los componentes principales en el hormigón – por áridos artificiales, e incluso de estos, utilizar los reciclados, como el plástico reciclado, que ya es un material que se está reciclando en la actualidad y que es necesario reciclar aún más, para que no quede en el medio ambiente, como se vio anteriormente.

Sumado al reemplazo de los áridos por plástico reciclado, está el hecho de que el plástico absorbe menos cantidad de agua, por lo que las mezclas de hormigón podrían llevar menos agua, ahorrándola.

“Se define una estructura de hormigón medioambientalmente sostenible como aquella cuyo impacto ambiental total a lo largo del ciclo de vida, incluyendo el uso de la estructura, sea reducido al mínimo”. (Asociaciones productoras de Hormigón a nivel Europeo), REDAC N° 11.

*Fig. 7. Fotografía Obra Hotel Westin Lima*



*Fuente: Constructora Graña y Montero S.A.*

#### 2.1.4. Hormigón convencional

El hormigón convencional está compuesto por cemento, áridos (arena y grava) y agua. El mortero es similar pero sin grava. Estos áridos no participan en el fraguado ni endurecimiento del material. Normalmente la relación para las mezclas de cemento y árido son de ratio 3:1 para morteros. El coeficiente de agua que lleva el hormigón convencional se encuentra entre 0.40 y 0.60, dependiendo de la función que tendrá el material. Si es para hacer estructuras deberá tener menor cantidad de agua, y si es utilizado para recubrimientos o morteros, contiene mayor cantidad de agua. El tamaño del árido y su granulometría también influyen en la cantidad de agua y en la consistencia del hormigón (la facilidad que tiene para deformarse cuando está fresco). Estos se clasifican por su consistencia en secos, plásticos, blandos y fluidos.

El hormigón convencional tiene un peso específico de  $2400 \text{ kg/m}^3$ . {{1 Weigler,Helmut 1974}} Resiste muy bien a los esfuerzos de compresión, pero su resistencia a tracción y flexión no es tan buena. En cuanto a compresión, resiste dentro del rango de  $150 \text{ a } 500 \text{ kg/cm}^2$  ( $15 \text{ a } 50 \text{ MPa}$ ), o más si se utilizan áridos especiales, y en cuanto a tracción, es del orden de un décimo de la resistencia a compresión. {{1 Weigler,Helmut 1974}} El tiempo de fraguado es de dos horas, pero el tiempo de endurecimiento de este material es progresivo. Durante las primeras 48 horas adquiere la mitad de la resistencia máxima, en 7 días, tres cuartas partes de la

resistencia y en 28 días es prácticamente la resistencia total de cálculo.

Acerca de los áridos empleados en el hormigón, estos se obtienen mezclando tres o cuatro grupos de distintos tamaños de granos, para alcanzar una granulometría óptima en la mezcla.

El agua de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad de la misma debe ser la estricta necesaria, ya que la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evapora y crea huecos en el hormigón disminuyendo la resistencia de este. A la mezcla de hormigón se le puede añadir aditivos, los cuales son sustancias o productos que se incorporan antes o durante el amasado, y producen la modificación de alguna de sus características, como por ejemplo el aditivo fluidificante, el cual le da plasticidad al hormigón, haciendo que se tenga que agregar menos agua de la requerida.

El hormigón es un material sumamente utilizado en la construcción en todo el mundo. La producción mundial del cemento fue de más de 2.500 millones de toneladas en 2007. Estimando una dosificación de cemento entre 250 y 300 kg de cemento por metro cúbico de hormigón, significa que se podrían producir de 8.000 a 10.000 millones de metros cúbicos, que equivalen a 1,5 metros cúbicos de hormigón por persona. {{8 Aïtcin, Pierre-Claude 2008}} Esta cifra es casi inigualable. Ningún material de construcción ha sido usado en tales cantidades y en un futuro no parece existir otro material de construcción que pueda competir con el hormigón en magnitud de volumen.

### 2.1.5. Hormigón aligerado

Los hormigones ligeros que son utilizados para estructuras, es decir el hormigón armado aligerado, necesita de áridos ligeros que tengan una resistencia a la compresión mínima y deben presentar densidades entre 1000 y 2000 kg/m<sup>3</sup>. {{1 Weigler, Helmut 1974}} Existen áridos naturales y áridos artificiales para añadir a las mezclas de cemento y crear un hormigón armado aligerado. Se puede observar en la *Tabla 3* las calidades de algunos hormigones obtenidos con áridos ligeros.

Los áridos ligeros de origen natural tienen pocas aplicaciones en el hormigón armado. Aunque cumplan los requisitos de calidad y constitución uniformes, el resultado será un hormigón de baja calidad, como por ejemplo el de piedra pómez, el cual es muy poroso y ligero, o de una densidad muy alta, como el de escorias de lava.

De igual manera, el hormigón es más trabajable con áridos naturales rodados, y

requiere menos agua de amasado que los áridos triturados, teniendo además la certeza de que son piedras duras y limpias. Los áridos triturados al tener más caras de fractura cuesta más ponerlos en obra, pero se traban mejor en la mezcla y esto se ve reflejado en una mayor resistencia, a diferencia de los granos más grandes.

Con respecto al tamaño de los áridos, si es mayor su tamaño (de los granos), son menores las necesidades de cemento y agua, ya que absorbe menos, lo que significa menor costo, y un menor impacto ambiental. En una mezcla de áridos, una compacidad elevada es aquella que deja pocos agujeros; se consigue con mezclas pobres en arenas y gran proporción de áridos gruesos, necesitando poca agua de amasado. El resultado es un hormigón resistente. En cuanto al contenido de granos finos de árido, estos hacen la mezcla más trabajable pero precisan más agua de amasado y de cemento.

Las parábolas de Fuller y de Bolomey, las cuales dan dos familias de curvas granulométricas, son utilizadas para poder

*Tabla 3. Clasificación de los áridos ligeros según la consistencia de sus granos y valores de orientación de las máximas resistencias a la compresión alcanzables por el hormigón*

Clase de árido	Tipo de árido	Densidad de los granos (Grupo de 8-16mm) (kg/m <sup>3</sup> )	Clase de resistencia que se puede alcanzar	Correspondiente hormigón Correspondiente (kg/m <sup>3</sup> )
Baja consistencia	Arcillas expandidas	700 a 900	hasta LBn 150	≤ 1300
Consistencia media	Pizarras y arcillas expandidas	1000 a 1300	LBn250 a LBn 350	1500 a 1700
Alta consistencia	Pizarras y arcillas expandidas	1200 a 1400	LBn 450 a LBn 550	1600 a 1800

*Fuente: Hormigones ligeros armados. Fabricación, propiedades, aplicaciones. Weigler, Helmut – Karl, Sieghart*

conocer las dosificaciones necesarias de áridos en la mezcla. (Fig. 8).

Los parámetros que determinan las características granulométricas de un árido son:

- El tamaño máximo del árido.
- La compacidad del árido. (Relación entre volumen real y volumen aparente, cuanto mayor sea la compacidad, menor será el volumen de agujeros que deja el árido).
- El contenido de granos finos. (Aumentan la docilidad y trabajabilidad del hormigón, se deben incrementar los contenidos de agua y cemento).

Para determinar la curva granulométrica utilizando la parábola de Fuller, con áridos redondeados cuyo tamaño máximo sea de  $50 \pm 20$  mm y contenido de cemento no inferior a  $300 \text{ kg/m}^3$ , {{1 Weigler,Helmut 1974}} se

sigue la parábola:

$$p = 100 \cdot \sqrt{d/D} \text{ donde;}$$

$p$  = porcentaje en peso que pasa por cada tamiz

$d$  = Diámetro de cada tamiz

$D$  = Tamaño máximo (diámetro) del árido

Para determinar la curva granulométrica utilizando la parábola de Bolomey, se considera incluido el cemento y su campo de utilización es mucho más amplio que el de la parábola de Fuller. {{1 Weigler,Helmut 1974}}

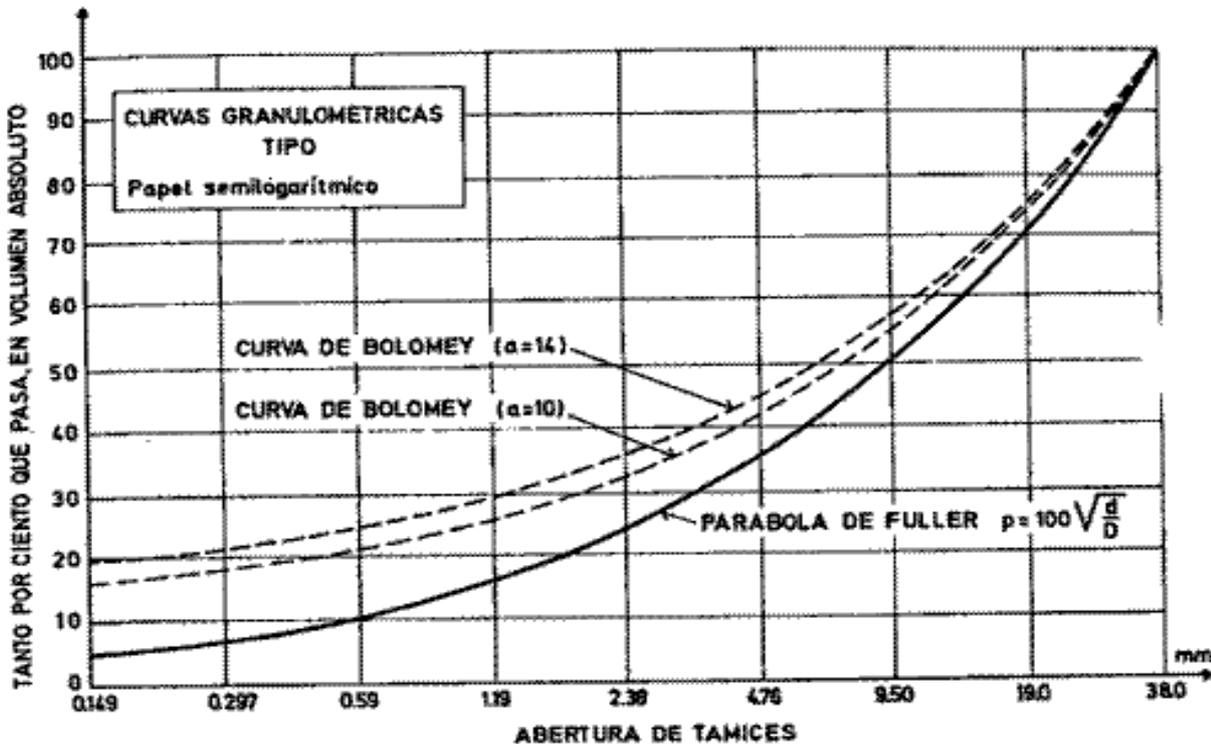
Su fórmula es:

$$p = a + (100 - a) \cdot \sqrt{d/D}$$

Con esto se puede determinar la granulometría del árido, y para la dosificación del hormigón, se deben tener en cuenta tres factores fundamentales, que determinarán las cantidades de agua, cemento y áridos:

- La resistencia
- La consistencia
- El tamaño máximo del árido

Fig. 8. Parábola de Fuller y Curva de Bolomey



Fuente: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real

### 2.1.6. Áridos y carga ligera

Los áridos constituyen el principal componente volumétrico del hormigón, ocupando entre el 65% Y 75% de su volumen total. De todos los áridos ligeros conocidos, solo algunos tipos son apropiados para la fabricación de hormigón armado aligerado, los que poseen la rigidez y resistencia apropiada para ser usados en elementos estructurales. El resto de áridos sirve para los hormigones aligerados no estructurales. En estos casos se puede fabricar hormigón ligero o morteros ligeros para hacer bloques o muros no portantes, recubrimientos o pavimentos.

#### 2.1.6.1. Áridos ligeros naturales

La extracción de áridos naturales ha causado considerables problemas de erosión a nivel mundial, generándose además, un déficit de estos materiales. Es por esto que se comenzó a crear no solo áridos ligeros, productos de materia prima natural, sino también productos del reciclaje en este último siglo XXI.

Entre los áridos ligeros naturales que pueden ser utilizados en elementos no estructurales están la piedra pómez, la perlita, la vermiculita, ya que no poseen la rigidez y resistencia suficientes para soportar cargas en un muro. Pueden usarse para muros no portantes, pavimentos, rellenar cúpulas y techos, precisamente porque son muy ligeros y tienen baja densidad.

Los áridos ligeros deben tener los granos de una densidad lo menor posible, con una rigidez y una resistencia propia

suficientemente elevada y ser de calidad uniforme.

Otros áridos ligeros son las ya mencionadas, arcillas expandidas, o pizarras con arcillas expandidas. Estos áridos sí resisten cargas, por lo que pueden ser utilizados en muros estructurales. Poseen densidades de  $1400\text{kg/m}^3$  o menores. Son materiales muy porosos (hasta 50% de su volumen) y esto se consigue mediante un tratamiento a altas temperaturas ( $1100^\circ\text{C}$  o mayores). Aquí ocurre la formación de gases de ciertos componentes de la materia prima, y se consigue la inclusión del aire en el material. Una parte de los gases originados quedan encerrados en esta masa viscosa y la expanden. A veces se realiza esto con vapor de aire encerrado en la materia prima. {{1 Weigler,Helmut 1974}}

#### 2.1.6.2. Áridos ligeros artificiales y reciclados

Dentro del grupo de los áridos ligeros existen los que son reciclados de los residuos de las plantas, pero que son de densidad neta muy alta, como la escoria de carbón, que tiene  $3000\text{ kg/m}^3$ , o la escoria de altos hornos, de  $2900$  a  $3000\text{ kg/m}^3$ . Esta última está formada por silicatos y otras bases, como producto de la fusión del hierro para la obtención del arrabio en un alto horno, es un material no metálico. Se utiliza para crear áridos reciclados para el hormigón. {{1 Weigler,Helmut 1974}}

La escoria de carbón es uno de los residuos producidos por las centrales térmicas que utilizan el carbón como combustible, para la producción de energía eléctrica, y que

hasta hace unos años ha producido problemas medioambientales. Este material es almacenado en escombreras al aire libre o balsas, y esto causa contaminación, como lo ocurrido en Aznalcóllar (Andalucía), el cual causó muchos daños ecológicos. La apariencia de esta escoria es la de una piedra volcánica. Su densidad en seco es de aproximadamente  $1000\text{kg/m}^3$ .

En Aragón, en el año 2004 se comenzó a utilizar por primera vez este tipo de reciclado, ya que en Andorra se puso en marcha la primera planta de reciclaje de escorias, producidas en la central térmica que Endesa posee en esta localidad. Esta escoria, además de tener otros usos, – para la tierra vegetal o como antideslizante sobre el hielo – es transformada en árido ligero de donde se obtienen hormigones y morteros para utilizarse en prefabricados de hormigón. Este proceso fue patentado a finales del siglo pasado. En el amasado del material se utiliza menor cantidad de agua y el peso final de los materiales prefabricados se reducen en un 30% aproximadamente con relación a los de áridos tradicionales.

Otro tipo de árido reciclado es el de gránulos de vidrio reciclado. Este es procesado hasta hacerse polvo, el cual se mezcla con agentes que expanden el material y se lleva a temperaturas entre  $700$  y  $800^\circ\text{C}$ , luego este material es aplastado para formar los gránulos que serán utilizados como áridos para el hormigón. Estos gránulos tienen entre  $0.04$  y  $16\text{mm}$  de diámetro.

Los gránulos de espuma mineral son una forma más de árido reciclado. Estos agregados están hechos de materiales minerales, con agentes de flujo y agentes

espumantes. Luego de que este material mineral es procesado, y de añadir los materiales constituyentes, estos gránulos de color verde son transformados en un material de consistencia espumosa y acristalada.

Otro árido fabricado del vidrio reciclado es la espuma de grava de vidrio. Este tiene una densidad aparente de  $120\text{kg/m}^3$  y los gránulos no absorben agua. Funciona como un gran aislante térmico.

Estos áridos reciclados, creados en el siglo XXI, muestran un avance en la tecnología, para evitar la extracción de materia prima no renovable de las canteras, y así, evitar la destrucción del paisaje. Empresas alemanas ya lo están utilizando y compiten en el mercado con mejoras en sus productos.

Los áridos utilizados en mezclas de hormigón o mortero aligerado deben tener una densidad baja, rigidez, una resistencia propia suficiente como para servir en muros de cerramiento y calidad uniforme. Si se utiliza plástico reciclado debe ser granulado, de tamaño similar, para que puedan ser introducidos en la masa del hormigón o mortero. Se deben realizar pruebas variando las dosificaciones para comparar las resistencias. La idea es utilizar menor cantidad de mezcla, y reducir tanto el peso del material como el impacto ambiental, incrementando el volumen con este árido reciclado y dándole mayores utilidades, como el aislamiento térmico en la vivienda, cualidad que el plástico atribuye al hormigón o mortero.

El plástico reciclado es un material poco denso, que al igual que los áridos ligeros utilizados, este podría ser introducido en la mezcla del hormigón como árido y

carga ligera. Una característica de este material, es que, al igual que los áridos naturales, no tienen buena resistencia a las cargas. Entonces, a medida que se aumenta la dosificación de plástico, la resistencia decrece. Es por esto que estos hormigones servirían para muros no estructurales, pavimentos, morteros, etc.

almacenados en depósitos al aire libre. Estos contaminan las aguas subterráneas y el subsuelo, por lo que debería ser un material cada vez menos utilizado.

### **2.1.7. Problemas causados por distintos áridos utilizados en el hormigón aligerado**

Los áridos naturales, como se ha mencionado anteriormente, son extraídos del medio ambiente, es decir de canteras, lo cual degrada el paisaje, causa problemas de erosión y agota estos recursos que demoran millones de años en recuperarse. Por lo tanto, se debería dejar de extraer esta materia prima, y comenzar a utilizar materiales que ya existen en el mercado, darles uso como áridos artificiales. Incluso deberían utilizarse también materiales que fueron residuos y que luego fueron reciclados. Esta sería una mejor forma de aprovechar los desechos que existen y darles un uso, de tal forma que no se gasta energía creando nuevos materiales que luego serán desechados, si no que se reutilizan o reciclan, y el ciclo de vida de estos materiales se alarga y se inserta al ciclo de vida del hormigón.

Como se ha visto, existen algunos áridos ligeros naturales reciclados de los residuos de las plantas, como los son la escoria de carbón, o la escoria de altos hornos. Estos materiales, si bien son producto de materia prima natural y son reciclados, generan problemas medioambientales al ser

## **2.2. Estado del Arte**

### **2.2.1. Estudios acerca del hormigón ligero**

Sobre el hormigón ligero existe mucha información. Se ha escrito sobre su historia a través del tiempo, sobre sus maneras de construirse, ya sea hormigón armado o no estructural, y sobre campañas experimentales involucrando el hormigón y otros materiales, como el plástico en este caso.

### **2.2.2. Estudios acerca del plástico reciclado**

Existen investigaciones desarrolladas para el uso de plástico reciclado. Existen muchas variedades de plástico reciclado, así que los estudios hechos son muy diferentes dependiendo del tipo de plástico y el uso que se le pretenda dar.

Se tiene información de la Recicladora de Plásticos de España, la cual habla de los tipos de plástico a reciclar y métodos de hacerlo. Como se ha visto, solo un pequeño porcentaje de los residuos de plástico son reciclados, el resto va a parar a rellenos subterráneos y a vertederos y es incinerado.

### **2.2.3. Investigaciones acerca del hormigón ligero con agregados de plástico reciclado**

Se han realizado algunas investigaciones sobre el comportamiento del hormigón cuando se le añade plástico. En algunos casos, este plástico es añadido como aditivos, de manera química, lo cual no es lo

que se pretende estudiar en esta investigación. Sin embargo, es importante conocer que existen estos métodos para utilizar el plástico reciclado. Se han encontrado unos estudios recientes sobre el plástico reciclado de botellas como aditivos en el hormigón. Este plástico tiene el nombre técnico de polietileno tereftalato (PET), y al descomponerlo químicamente se obtienen nuevas cadenas, llamadas poliéster insaturado. La característica de esta es que hace que todas las cadenas puedan unirse formando una red. Si esta matriz es rellena con arena o grava, el producto obtenido es un hormigón cuyo aglutinante es un polímero, llamándose hormigón polimérico. Este hormigón sería muy resistente, pero no es un hormigón aligerado. Estudios sobre este tema fueron hechos en Perú hace algunos años, por el Prof. Javier Nakamatsu.

Otra investigación realizada por K.S. Rebeiz y A.P. Craft, en el año 1995, "Plastic waste management in construction: technological and institutional issues", en Estados Unidos, estudia el caso del hormigón de poliéster que lleva plástico reciclado PET. En estos estudios también se modifican químicamente los residuos de plástico, para producir resinas insaturadas de poliéster y mezclarlo con los áridos para producir este hormigón de poliéster. Se hicieron pruebas de resistencias y durabilidad y se observó que el comportamiento de este hormigón fue positivo, resultó ser más resistente y más durable que el hormigón convencional de cemento portland, y que fragua en horas, a diferencia del hormigón convencional que necesita semanas.

En el artículo de la revista "Waste Management", titulado "Use of plastic in

concrete mixture as aggregate replacement”, (2007), por Zainab Z. Ismail y Enas A. AL-Hashmi, se recopilan estudios hechos acerca del hormigón polimérico, que lleva resinas de poliéster insaturado y polietileno tereftalato (PET). También se estudia el polipropileno en forma de fibras, para darle mayor resistencia al hormigón. Muchas de estas investigaciones son acerca de plásticos como aditivos para el hormigón, lo que es diferente a los áridos, ya que estos le dan otras propiedades al hormigón, distintas a las buscadas con los áridos de plástico. Una investigación llevada a cabo para este estudio fue similar a la estudiada en este documento. Se mezcló cemento portland, arena fina, grava y plástico reciclado en dosificaciones de 0%, 10%, 15% y 20%, los cuales reemplazaban arena. Se realizaron ensayos de consistencia y escurrimiento, de densidad del mortero fresco y endurecido, y de resistencias a compresión y flexo tracción. Los resultados mostraron que la consistencia de las mezclas fue decreciendo con el aumento de plástico reciclado, esto ocurre porque los gránulos de plástico tienen formas angulares y no uniformes, lo que da resultado a una menor fluidez del material. La densidad del mortero fresco tiende a decrecer con el aumento del plástico, al igual que la densidad del mortero endurecido, aunque esta densidad va incrementándose con el tiempo. Los ensayos de resistencias a compresión y flexo tracción indicaron que a mayor cantidad de plástico, menor es la resistencia, como indican todos los estudios hechos acerca de los esfuerzos. Esto puede deberse a la pobre adhesión entre la superficie del plástico y la pasta de cemento.

Existen más investigaciones sobre el hormigón que lleva plástico reciclado como árido ligero, sin embargo no son abundantes las investigaciones que hay, aunque cada vez los desperdicios de plástico son mayores y el usarlos como relleno, enviarlo a vertederos o incinerarlos pronto dejarán de ser soluciones, o en realidad nunca lo fueron, ya que el plástico demora cientos de años en degradarse debajo de la tierra y la incineración de estos producen emisiones de gases tóxicos y CO<sub>2</sub>.

Algunos investigan el caso del hormigón con agregados de residuos de plástico de botellas (PET). Estudios realizados por Yun-Wang Choi, Dae-Joong Moon, Jee-Seung Chung y Sun-Kyu Cho en Corea Del Sur en el año 2003 “Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete” mostraron el comportamiento de este hormigón frente a los esfuerzos de compresión y flexo tracción. También se estudió el módulo de elasticidad, la consistencia, el escurrimiento y la densidad. Las dosificaciones de plástico utilizadas en este estudio fueron de 0%, 25%, 50% y 75%, reemplazando áridos convencionales en volumen. Se observó que la densidad decreció con el aumento de plástico, al igual que las resistencias a compresión y flexo tracción, que decrecieron en un 33%.

Rosana Gaggino, Ricardo Arguello y Horacio Berretta, del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina, estudiaron la aplicación del plástico reciclado en elementos constructivos, “Aplicación de material plástico reciclado en elementos constructivos a base de cemento”, en el año 2007. Se fabricaron

ladrillos, bloques y placas para ser utilizados como cerramiento lateral no portante en viviendas económicas. Este plástico también provenía de residuos de botellas de bebidas y de envoltorios de alimentos. Se reemplazaron los áridos pétreos por este árido de plástico triturado. Se estudió el peso específico y se observó que es menor que otros materiales de construcción, por ejemplo, los bloques con PET tienen un peso específico de  $425 \text{ kg/m}^3$  mientras que los ladrillos comunes de tierra tienen un peso específico de  $1602 \text{ kg/m}^3$  y los bloques de hormigón no portantes  $875 \text{ kg/m}^3$ . También se estudió la conductividad térmica ( $\lambda$ ), lo cual no se ha visto en ningún otro estudio previo. Se observó que un muro de bloques de hormigón no portantes tiene un coeficiente de  $1.48 \text{ W/m.K}$ , y un muro de ladrillos con plásticos varios tiene un coeficiente de  $0.18 \text{ W/m.K}$ , lo que indica que mejora mucho el muro con contenido de plástico. Se estudió la resistencia a la compresión, y se observó que esta es inferior en muros con bloques con contenido de plástico PET ( $1.02 \text{ MPa}$ ), mientras que los muros de bloques de hormigón no portantes convencionales tienen  $2.00 \text{ MPa}$  (y los portantes  $4.00 \text{ MPa}$ ). Además se construyeron prototipos de vivienda con ladrillos con plástico reciclado. Se concluyó que debido a su bajo costo y tecnología simple, este material es apto para viviendas y construcciones de interés social.

En investigaciones llevadas a cabo por Y. W. Choi, para la revista "Cement and Concrete Research" (2005), se estudiaron los efectos del polietileno tereftalato (PET) de las botellas de plástico como un árido para el hormigón, viendo cómo afecta a su densidad. Se plantearon distintas proporciones de

mezcla de hormigón, con ratios de 45%, 49% y 53% de agua con cemento, y para reemplazarlos se plantearon ratios de 0%, 25%, 50%, y 75% de los áridos de plástico de botellas, (como un volumen de agregado fino). La densidad de la mezcla del hormigón decreció con el incremento de contenido de los agregados de plástico.

Otras investigaciones estudian el caucho como agregado de plástico en la mezcla de morteros. C. E. Pierce y M. C. Blackwell de la Universidad de Columbia, estudiaron el comportamiento del mortero con agregados de caucho de residuos de neumáticos. En su publicación, "Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill", describen la campaña experimental que llevaron a cabo, en donde se reemplazó árido (arena) con tiras de caucho rallado de 2.5 a 30 cm para fabricar un material ligero. Se varió la relación agua cemento para obtener la cantidad adecuada. Los resultados indicaron que el caucho puede ser utilizado exitosamente para producir morteros ligeros de  $1.2 \text{ g/cm}^3$  a  $1.6 \text{ g/cm}^3$ , con resistencias a compresión de  $269 \text{ kPa}$  a  $1194 \text{ kPa}$ . Este material podría ser usado como mortero para rellenar, curar y sellar estructuras de puentes y cimentaciones. Si bien este es un material distinto, obtenido de áridos diferentes a los gránulos de plástico reciclado, se obtienen resultados del mismo tipo, es decir, las densidades decrecen y las resistencias también. Es lo suficientemente resistente como para soportar el requerimiento mínimo de cargas. Muestra ser un material dúctil y de alto aislamiento térmico, aunque esto debe ser mejor investigado ya que es una teoría. Se le puede dar muchas utilidades a este

mortero en la construcción, hecho con material reciclado.

Otro caso estudiado, es el metro de Granada. En la publicación del año 2009 de la revista "Obras Públicas", Alberto Sánchez López (Canales y Puertos Gerente de Proyectos y Obras, Ferrocarriles de la Junta de Andalucía), entre otros, crean el artículo "Desarrollo y experimentación del sistema M.L.G. (Metro ligero de Granada): Primer sistema nacional de vía en placa embebida en hormigón realizado con una mezcla de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y resina de matriz polimérica". Como su nombre lo indica, es el estudio del sistema utilizado para las estaciones del metro de Granada, el cual se hizo con placas de hormigón conteniendo una cantidad medianamente baja de áridos de caucho de neumático rallado. Además se utilizó un hormigón polimérico, el cual contiene aditivos a base de resinas de plástico. Entonces es una combinación de los dos tipos de reciclaje de plástico vistos, el químico, que posee este plástico en la mezcla, como aditivos (lo que no lo hace ligero), y el que contiene áridos de caucho, el cual si es un material ligero. De esta forma se crea un hormigón estructural resistente y ligero. Este material se aplicó con éxito para un tramo de prueba de 800 metros lineales de vía simple. Se pretendía atenuar de vibraciones, parámetro clave en un sistema de vía urbano debido a la presencia de edificaciones cercanas, lo cual se logró con éxito, y se contribuyó al reciclaje del caucho.

Investigaciones acerca del plástico termoestable – plástico que no puede ser derretido en el proceso de reciclaje como los termoplásticos – fueron realizadas en

Bangkok, en el año 2007. En la publicación "Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete", llevadas a cabo por Phaiboon Panyakapo y Mallika Panyakapo, se estudió la melanina para la aplicación del hormigón ligero. En Tailandia se construye mucho con hormigón ligero, para muros exteriores e interiores, pero que no tenga que resistir cargas laterales. El material estudiado fue triturado y agregado a la mezcla de hormigón, junto con polvo de aluminio, para generar reacciones químicas que creen burbujas de gas dentro de la mezcla. Los resultados obtenidos mostraron que cuando existe una gran cantidad de plástico en la mezcla, estos tienden a separarse del cemento, tienen una unión pobre. Se observó también que las resistencias a compresión decrecen, esto podría mejorar reduciendo el polvo de aluminio para que el hormigón sea menos poroso o reduciendo el nivel de melanina en la mezcla para añadir mayor cantidad de arena, pero así también se incrementa la densidad. Con las dosificaciones adecuadas se puede conseguir un material ligero no portante que está dentro de los requerimientos para construir muros de cerramiento.

Se han encontrado además, estudios más relacionados con el presente, en donde se realizan experimentos con plástico reciclado en gránulos, para un mortero de hormigón convencional, reemplazando áridos convencionales.

En la investigación llevada a cabo en el año 2007 por O.Y. Marzouk, R.M. Dheilly y M. Queneudec, "Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites" de la revista "Waste Managment", se desarrolla un estudio sobre

los materiales de construcción a base de cemento que llevan plástico de botellas recicladas (PET) en reemplazo parcial o total de la arena. La arena es reemplazada del 2% al 100% en volumen por este plástico granulado – el cual tiene como tamaño máximo de grano 5mm –. Se estudiaron la densidad aparente y las características mecánicas de este hormigón. Se observó que cuando se substituye arena por plástico granulado en dosificaciones menores a 50%, las resistencias a compresión y flexo tracción casi no se ven afectadas, y que estos hormigones pueden tener éxito en la construcción. Esto puede resultar como un material de bajo costo y principalmente, se contribuiría con el reciclaje.

En la siguiente investigación de la revista “Waste Management” titulado “Use of recycled plastic in concrete: A review”, Por Rafat Siddique, Jamal Khatib e Inderpreet Kaur, se pudieron observar distintos resultados: El agregado de plástico desechado puede ser utilizado con éxito para reemplazar a los agregados convencionales, para ciertos propósitos. El uso de plástico reciclado en el hormigón reduce la densidad aparente de este. Comparado con el hormigón convencional, la densidad aparente se reduce en 2,5 – 1,3% (para el hormigón con áridos de plástico reciclado que va del 10% al 50% de contenido del árido). La resistencia a compresión del hormigón que contenía 10 – 50% de áridos de plástico reciclado va de 48 a 19 MPa. Esta resistencia disminuyó con el aumento de plástico. La reducción de la resistencia de compresión fue entre 34 y 67% (para hormigón que contenía 10 – 50% de áridos de plástico reciclado). La resistencia a la tracción de este material decreció con el

aumento de este plástico, en 17% para un hormigón que contenía el 10% de áridos de plástico reciclado. Se encontró que esta resistencia decrecía cuando el ratio de agua – cemento se incrementaba. Sin embargo, el hormigón con áridos de plástico mostró un mejor comportamiento dúctil que el hormigón con áridos convencionales. Este comportamiento dúctil podría ser de una ventaja significativa en la reducción de la formación y propagación de grietas. Los plásticos mixtos rallados pueden otorgar refuerzo al hormigón. Esto resultaría en una ganancia en resistencia al impacto y a evitar algunas grietas por encogimiento, y mejoraría la impermeabilidad. Sin embargo, en este caso hubo una reducción en la resistencia abrasiva del hormigón. En el caso de la fibra de polipropileno, este tiene un efecto adverso en el contenido de aire del hormigón. Con la inclusión del 0,5% de esta fibra, el contenido de aire se incrementó y la trabajabilidad se redujo. Sin embargo, la fibra de polipropileno mejoró la resistencia al impacto del hormigón, significativamente.

Una publicación de la revista “Construction and Building Materials”, presentada en el año 2012, “Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review” de Nabajyoti Saikia y Jorge de Brito, muestra estudios hechos acerca de las propiedades de los agregados de plástico y como contribuyen a la mejora y trabajabilidad del hormigón. Se trituraron botellas de plástico y luego se tamizó para obtener el tamaño de granza adecuada (810 – 14 mm). Se estudiaron la densidad aparente, gravedad, absorción de agua, resistencias a compresión y flexo tracción, módulo de elasticidad, temperatura

de descomposición de los agregados, temperatura de fusión y de degradación inicial, índice de fluidez, conductividad térmica y capacidad calorífica. En cuanto a la densidad aparente, esta decreció con el aumento del plástico, como en varios casos, la absorción de agua también decreció, ya que el plástico no absorbe agua como el agregado fino que absorbe mayor cantidad. Las resistencias decrecieron con el aumento del plástico, como en todos los casos vistos. Sobre la conductividad térmica, se observó que el coeficiente decrece con el aumento del plástico, por lo que puede ser un buen aislante térmico. En esta investigación se habla de otros estudios hechos, a manera de recopilación de experimentaciones y resultados, como el que también se investigó para este caso, como es el que desarrollaron A.A. Al-Manaseer y T.R. Dalal.

En estos estudios, realizados por A.A. Al-Manaseer, y T.R. Dalal, para "Concrete International" (1997), "Concrete Containing Plastic Aggregates", se investigó acerca del efecto de los agregados de plástico en la densidad aparente del hormigón y de su comportamiento frente a las cargas. El hormigón creado contenía agregados de plástico rallado de post consumo, (residuos de parachoques de automóviles). En estas mezclas de hormigón se utilizó cemento portland, humo de sílice condensado, áridos convencionales (grava de dimensiones de 10mm máximo y arena fina), los agregados de plástico mencionados con un máximo de 13mm de dimensión de la granza, aditivo fluidificante y agua. Se realizaron doce mezclas con diferentes relaciones agua cemento (0.28, 0.40 y 0.50) y con dosificaciones de plástico distintas (0%, 10%,

30% y 50%). Se añadió fluidificante en porcentajes del total del peso, de 2, 1.5 y 0.5 para los coeficientes de agua cemento respectivamente.

Para cada probeta resultante, se realizaron ensayos de consistencia, densidad aparente, resistencias a compresión y a flexo tracción. Se observó que el agregado de plástico no absorbe ni añade agua a la mezcla, esto quiere decir que a mayor porcentaje de plástico, mayor cantidad de agua que queda libre, haciendo la mezcla más líquida. Esto da como resultado un mayor valor de escurrimiento y una menor trabajabilidad.

Las mezclas fueron decreciendo en densidad aparente a medida que fue aumentando el porcentaje de plástico. Se observó que la reducción de la densidad aparente es directamente proporcional al contenido de árido de plástico. La media para la densidad aparente del plástico utilizado fue de 485 kg/m<sup>3</sup>.

Con los ensayos de resistencias, se pudo observar que las mezclas conteniendo mayores cantidades de agregados de plástico tuvieron una menor resistencia a compresión. Los resultados fueron: para hormigones conteniendo 10%, 30% y 50% de agregados de plástico, una reducción en resistencia a compresión de 34%, 51% y 67% respectivamente. Esto puede deberse a la baja resistencia a esfuerzos, característica del plástico.

Luego de los ensayos de resistencia a compresión, las superficies agrietadas mostraron que los agregados de plástico en vez de separarse se concentraron, entonces no hubo una típica falla del hormigón, si no

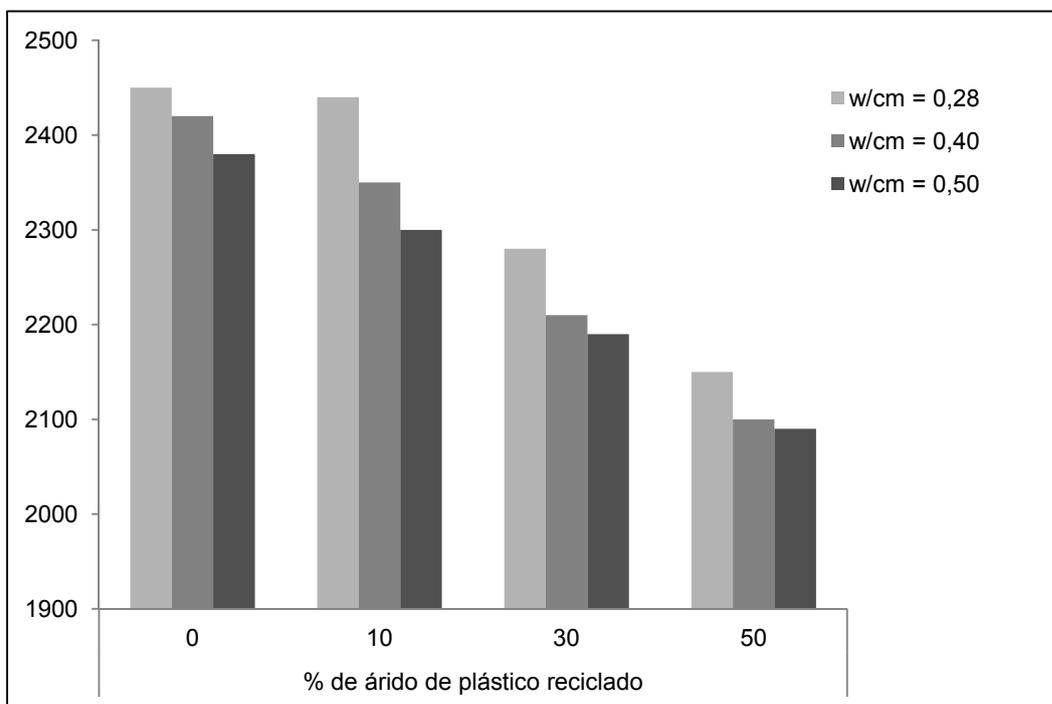
que fue una falla gradual. A medida que el plástico fue aumentando en la mezcla, las fallas fueron siendo más dúctiles, y las probetas fueron más capaces de resistir la carga unos minutos más luego de fallar, sin desintegrarse por completo.

En cuanto a las resistencias a flexo tracción, ocurrió lo mismo, a medida que el porcentaje de plástico aumentó en la mezcla, esta resistencia decreció. Las fallas encontradas en las probetas no mostraron un comportamiento frente a resistencias a compresión, es decir, las fallas ocurrieron de comportamiento típico, fue similar al manera gradual y las muestras fueron capaces de resistir la carga por unos minutos luego de fallar sin la total desintegración de estas. Estas fallas fueron más dúctiles a medida que el plástico fue aumentando en la mezcla.

También se observó que el módulo de elasticidad decreció con el aumento del porcentaje de agregados de plástico. Al aumentarse la relación agua cemento, el modulo de elasticidad fue decreciendo.

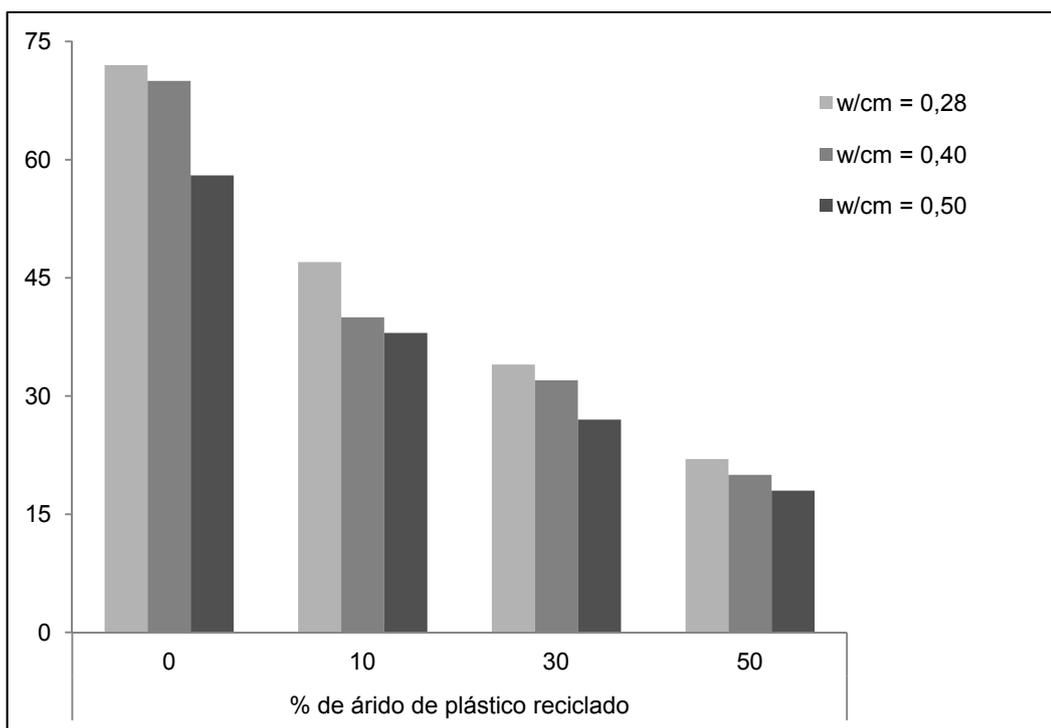
En conclusión, la investigación indicó que sí se puede utilizar plástico como reemplazo para los agregados convencionales en el hormigón. Se realizó una prueba en campo fabricando una losa de 150mm, y se pudo comprobar que es posible realizar esto y que el uso del plástico puede tener éxito en las mezclas de hormigón. El plástico además le da una menor densidad aparente comparada con la del hormigón convencional y tiene un mejor comportamiento dúctil, Esto puede ser ventajoso para minimizar la formación de grietas en las estructuras de hormigón.

Fig. 9. Relación entre contenido de agregados de plástico y la densidad aparente del hormigón ( $kg/m^3$ )



Fuente: Concrete Containing Plastic Aggregates. A.A. Al – Manaseer y T.R. Dalal, (1997)

Fig. 10. Relación entre contenido de agregados de plástico y los esfuerzos a compresión (MPa)



Fuente: Concrete Containing Plastic Aggregates. A.A. Al – Manaseer y T.R. Dalal, (1997)

Por otro lado, se ha investigado acerca de materiales de construcción con agregados no convencionales, para dar mayor trabajabilidad a estos. Existe una tesis doctoral, en la cual, su procedimiento de trabajo e investigación es similar al presente estudio, aunque los materiales sean diferentes. Cesar Reyes Nájera, autor de la tesis “Estudio del comportamiento de morteros reforzados con fibras de maíz, para componentes de viviendas de bajo coste”, (Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1 de la Universidad Politécnica de Catalunya), en el año 2009, investigó las posibilidades de las fibras de planta de maíz para usarse como agregados en los materiales de construcción, específicamente de morteros de cal, para conseguir diferentes formas de tratamiento y poder asegurar su resistencia y duración. Es un estudio teórico – experimental, como el

que se está llevando a cabo en el presente estudio. Se investigan la densidad, docilidad, resistencias a flexión y compresión, capacidad de absorción de agua y durabilidad del material, por medio de la investigación bibliográfica y posteriormente una campaña experimental en donde se realizan los ensayos pertinentes. Por otro lado, se realizó un estudio de tecnologías disponibles de construcción de este material para viviendas de interés social, en el panorama latinoamericano. Se investigó la producción de morteros con cemento y con cal, en forma de bloques. Las probetas fueron creadas y ensayadas para los estudios mencionados, de forma muy similar a la de este estudio, utilizando herramientas y encofrados similares. Los resultados obtenidos mostraron que la inclusión de fibras tratadas en matrices de cal mejora las características del mortero. Las

características mecánicas del bloque desarrollado en la campaña experimental permiten su uso como elemento de carga en tipologías de vivienda unifamiliar de hasta dos plantas como máximo. Además pueden ser utilizados como elementos de cerramiento dentro de sistemas con elementos portantes de hormigón en viviendas. Es algo similar lo que se plantea conseguir con esta investigación de hormigón con agregados de plástico reciclado.

Otra tesis doctoral estudiada fue la escrita por Luiz Henrique MacCarini Vefago, “El concepto de reciclabilidad aplicado a los materiales de construcción y a los edificios: propuesta de índices para evaluar la reciclabilidad de los sistemas constructivos”, (Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1 de la Universidad Politécnica de Catalunya), en el año 2011. Para la investigación presente, interesó más saber sobre la parte teórica, la información que está escrita sobre las políticas y procesos de reciclaje, los áridos productos de reciclaje, la arquitectura sostenible con materiales reutilizados y reciclados y la sección de materiales en la que se habla del plástico natural y reciclado y sus formas de uso en la construcción y deconstrucción. En esta investigación se habla del ciclo de vida con cierre de los materiales, y del método cradle-to-cradle (de la cuna a la cuna) en donde luego de la utilización del material este se lleva a reutilizar o es reciclado para que vuelvan a tener un uso, o vuelve a la tierra donde sirve como nutrientes para la naturaleza. En el caso del plástico, se describe el tipo de material que es, es decir, que son derivados básicamente del petróleo, y que existen los termoplásticos y los

termoestables. Los primeros pueden derretirse una y otra vez para tener distintas aplicaciones, de modo que pueden tener un alto grado de reciclaje – como el PVC – y los segundos soportan una única fusión irreversible, se degradan antes de llegar al punto de fusión. En este estudio se muestran muchas formas de reciclaje del plástico en la construcción, como por ejemplo paneles aislantes de plástico reciclado o carpintería de ventanas. Una de las conclusiones referentes al tema tratado es que cada vez más fabricantes están desarrollando productos con contenido reciclado para la puesta en las edificaciones, así se reduce el impacto ambiental provocado por los residuos.

Como estas investigaciones mencionadas existen algunas más, las cuales hablan de la utilización de distintos tipos de plástico reciclado en la construcción, como aditivos o áridos, en materiales como el hormigón a base de cemento o de cal, para usos como bloques o morteros y también para asfaltos y pavimentos. Mucho varían los resultados con un tipo de plástico y una granulometría o forma determinada de otros, ya que sus propiedades son distintas y las resistencias y características del material resultante cambian. De igual manera es de interés saber lo que existe y hacer un estado previo del arte para aprender sobre las campañas experimentales y las posibilidades de nuevos materiales que existen.

### 2.3. Hipótesis de trabajo

Se plantea como hipótesis general que la mezcla de mortero con agregados de plástico reciclado va a ir perdiendo resistencia tanto a compresión como a flexo tracción a medida que se va añadiendo plástico, pero va convirtiéndose en un mejor aislante térmico. También, se va haciendo más ligero, a mayor cantidad de plástico, ya que la arena tiene un peso específico mayor al del plástico reciclado.

En cuanto al plástico, al encontrarse un nuevo uso para este, debería ser motivo para que las recicladoras piensen en aumentar el porcentaje de plástico que se recicla, y no permanecer en el 7% de plástico que llega a ser reciclado, siendo lo demás llevado a los vertederos, usado como rellenos para terrenos o siendo incinerados.

Una hipótesis más específica de este material, es que este mortero no tendrá un uso estructural, si no que será usado para bloques, para muros de cerramiento. Los porcentajes de plástico determinarán los usos, por ejemplo, el mortero con 10% de plástico tendrá este uso de bloques para muros, tal vez de uno o dos niveles. La

mezcla con 25% de plástico reciclado tal vez pueda servir para bloques de muros también, y los morteros con 50% de plástico tendrán un posible uso como recubrimientos o soleras. La mezcla con 70% de plástico no podrá usarse en elementos verticales, ya que este mortero no tendría la consistencia adecuada y sería muy poco resistente, pero probablemente podría servir como pavimentos o soleras, al ser sumamente ligero y manejable.

*Fig. 11. Vivienda de un piso con muros fabricados con bloques conteniendo plástico reciclado*



*Fuente: Aplicación de material plástico reciclado en elementos constructivos a base de cemento. R. Gaggino, R. Arguello y H. Berretta (2007)*



### 3. PLAN DE ENSAYOS

#### 3.1. Teoría e Investigación

Se inició el trabajo con la investigación del estado del arte acerca del tema. Se recopiló información y se realizó una exploración bibliográfica acerca de la teoría y de la práctica, es decir de experimentos hechos previamente, para conocer el camino a seguir y los resultados obtenidos para tener ideas de qué esperar al momento de realizar la campaña experimental.

Se estudiaron también algunos casos de construcciones hechas de hormigón con agregados de plástico, algunos casos de polímeros, o caucho, como las estaciones de Metro de Granada por ejemplo, en donde se utilizó una mezcla con caucho reciclado de neumáticos. Sin embargo, no se han encontrado muchas construcciones donde utilizan morteros con plástico, por lo que no es tan común.

A medida se iba profundizando en las investigaciones, se fue formando una hipótesis, al conocer más sobre el tema y los materiales involucrados. A partir de la documentación encontrada, se procedió a armar el plan de trabajo y el enfoque de la investigación, para que con lo ya conocido se tenga un punto de inicio para continuar, corroborando algunos resultados y buscando otros, como por ejemplo corroborando las resistencias a compresión y flexo tracción del material con las pruebas necesarias en la parte experimental, y buscando nuevos resultados, como la conductividad térmica de

este mortero, con distintos porcentajes de agregado de plástico reciclado.

Con lo visto en otras campañas experimentales, se optó por tener 5 tipos de probeta de mortero, con agregados de plástico reciclado de PVC de 0%, 10%, 25%, 50% y 70%, y con 2 tipos más de probetas con agregado de plástico reciclado con contenido de carbono, con dosificaciones de 25% y 70%. De esta manera se puede observar lo que ocurre al tener cantidades mayoritarias de plástico.

Fig. 12. Fotografía: Plástico reciclado de PVC



Fuente: Propia. Plástico obtenido de la recicladora de plástico Plasper.

Fig. 13. Fotografía: Plástico reciclado con contenido de carbono



Fuente: Propia. Plástico obtenido de la recicladora de plástico Plasper.

Se realizó una profunda investigación sobre el plástico, el estado en el que se encuentra el plástico reciclado, sus usos y características. Luego se procedió a coordinar con la recicladora de plástico *Plasper*, ubicado en La Roca del Vallès, para que puedan proporcionarnos la cantidad de plástico necesaria para las muestras a realizar. Se visitó la recicladora, para poder conversar con el director de la planta, conocer más sobre el plástico que reciclan y poder recogerlo. Se obtuvieron dos tipos de plástico reciclado, uno de reciclado de PVC, de color negro, como se muestra en la imagen (Fig. 12.) y otro hecho con carbono, de color blanco (Fig. 13). Ambos siendo gránulos de 4mm de diámetro aproximadamente.

### **3.2. Campaña Experimental: Creación del hormigón ligero con agregados de plástico reciclado**

Los trabajos de la campaña experimental se desarrollaron en el laboratorio de materiales de la Escuela Politécnica Superior de Edificaciones de Barcelona (EPSEB) de la Universidad Politécnica de Cataluña. Habiendo obtenido el plástico reciclado se llevó al laboratorio para comenzar a fabricar las probetas, con los porcentajes de plástico mencionados anteriormente.

Se utilizaron moldes metálicos y de poliestireno expandido para la fabricación de las probetas prismáticas, de dimensiones de 40 x 40 x 160mm y 40 x 150 x 150mm. Estas medidas de los moldes cumplen con las medidas normativas de las probetas

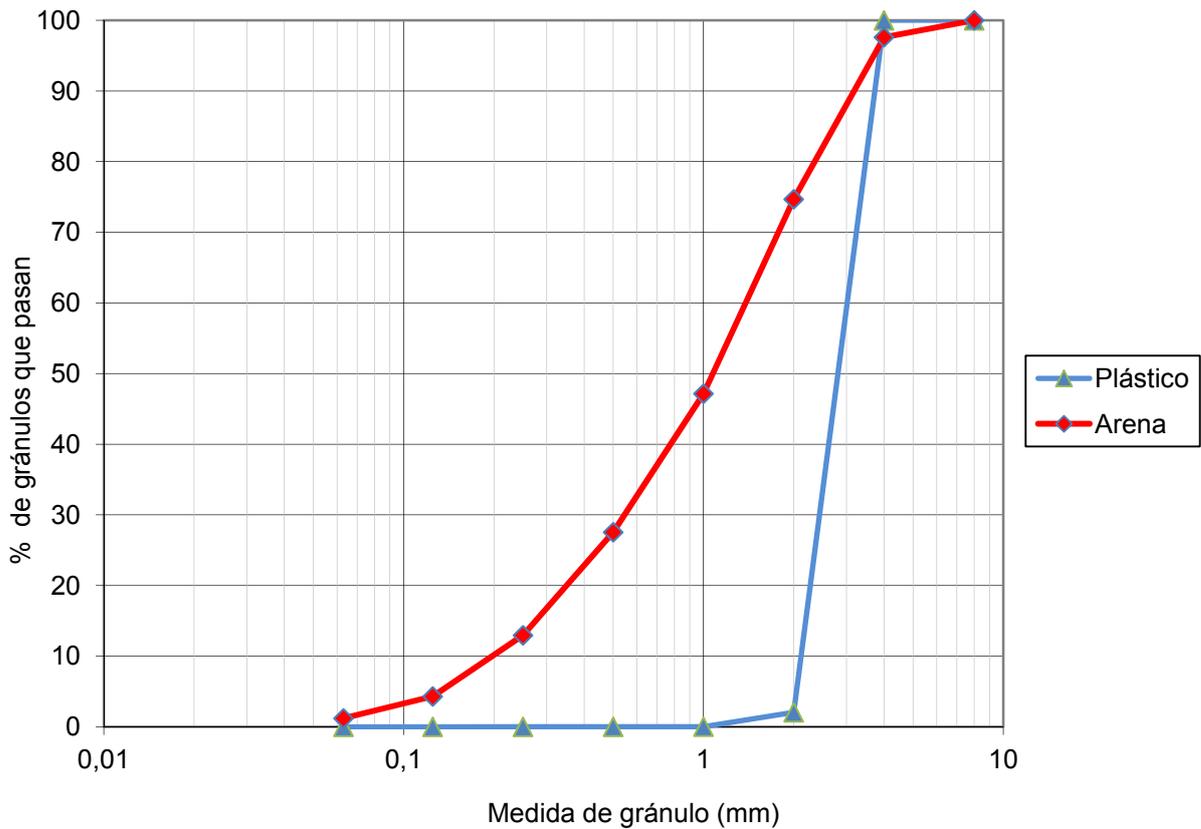
prismáticas que define la norma UNE EN-1015-2. En total se hicieron 42 probetas de 40 x 40 x 160mm (seis por cada dosificación) y 14 probetas de 40 x 150 x 150mm, (dos por cada dosificación), para las dosificaciones de 0%, 10%, 25%, 50%, 70% de plástico reciclado de PVC y dos últimas con 25% y 70% de plástico reciclado con contenido de carbono.

Para el reemplazo de árido de arena por los gránulos de plástico reciclado, se estudiaron las curvas granulométricas de ambos materiales, para determinar las cantidades y tamaños de gránulos que se tuvieron que intercambiar. Se utilizaron los tamices de hasta 4mm para medir ambas curvas. Los resultados, como muestra la gráfica (Fig. 14.) en la página siguiente, indica que los gránulos de plástico reciclado son más homogéneos que en el caso de la arena, la cual tiene gránulos de todos los tamaños hasta llegar a 8mm en algunos casos. Se llegó a la conclusión que se debía cambiar arena por plástico perteneciente al grupo de granos de 2mm y mayores, el cual era un 25% de la cantidad total de arena.

Luego se procedió a pesar la cantidad necesaria de árido, para luego pasarla por el tamiz, no permitiendo el paso de granos de 2mm o más grandes. Una vez obtenidos los granos de arena más grandes, se pesó la cantidad necesaria a ser cambiada por plástico, y luego se retiró esta arena para agregar la misma cantidad – no en peso si no en volumen – de gránulos de plástico.

Para la mezcla se utilizó cemento portland y como árido arena fina y el plástico reciclado. Se añadió a la mezcla, diluido en agua, un aditivo fluidificante para hacer la

Fig. 14. Gráfica de curvas granulométricas de la arena y el plástico reciclado



Fuente: Antonia Navarro Ezquerro, Laboratorio de Materiales de la EPSEB

mezcla más manejable, en cantidades del 1% del cemento. La dosificación del mortero se estableció de 1:3 y la relación cemento agua varió según las dosificaciones de plástico, ya que con el aumento del porcentaje del plástico reciclado, había menos árido que absorbía agua y por tanto quedaba más agua en la mezcla. Entonces para que este mortero tenga una consistencia adecuada se disminuyó la cantidad de agua con cada aumento de plástico. Para las dosificaciones de plástico mencionadas de 0%, 10%, 25%, 50% y 70% se utilizó un coeficiente de 0.52, 0.51, 0.50, 0.48 y 0.47 respectivamente. Se hicieron ensayos previos para conseguir la cantidad de agua de amasado necesaria, para conseguir las mismas consistencias en todos los morteros, por lo que se hicieron pequeñas

cantidades de mortero antes de hacer las mezclas en las cantidades necesitadas para las probetas. Una vez obtenidos los números y las cantidades de cada material, se comenzó con las mezclas finales para cada dosificación.

Fig. 15. Báscula utilizada para pesar los materiales



Fuente: Propia.

Tanto la medida de agua como la de polvo de cemento, arena y gránulos de plástico se pesaron con una báscula de sensibilidad 0,1gr para una mayor precisión. (Fig. 15).

Luego de mezclar el cemento con el árido se llevó a amasar el material a la máquina amasadora de la marca Matest, de dos velocidades, siendo la velocidad lenta de rotación de  $140 \pm 5$  rpm, la velocidad rápida de  $285 \pm 10$  rpm y la velocidad de traslación de  $62 \pm 5$  rpm para la velocidad lenta y de  $125 \pm 10$  rpm para la velocidad rápida. La mezcla en polvo, previamente mezclada manualmente, tuvo 30 segundos de amasado en la máquina, a continuación se añadió la mitad de la mezcla de agua con fluidificante, y se continuó amasando 30 segundos más, para luego añadir un cuarto de la mezcla, amasar 30 segundos más y nuevamente el cuarto restante del agua. Este amasado se realizó con la velocidad lenta. Luego de los 90 segundos, sin detener la máquina amasadora, con la última adición de agua, se cambió la velocidad a rápida, y se mantuvo por 60 segundos. Posteriormente se detuvo la máquina para amasar manualmente durante 15 segundos, para asegurar que la mezcla no se haya quedado en las paredes, y luego se dejó 75 segundos reposando. Se arrancó nuevamente la máquina en velocidad rápida, 60 segundos más. Con esto, se terminó el proceso de amasado y la mezcla se llevó a hacer pruebas de consistencia y densidad, para asegurar que tenga las características adecuadas (Fig. 16 y Fig. 17).

Para la comprobación de la consistencia, se llevaron a cabo ensayos de reología. El primer ensayo se realizó con una

Fig. 16. Máquina amasadora con la mezcla



Fuente: Propia.

Fig. 17. Mezcla de mortero amasado



Fuente: Propia.

Fig. 18. Mortero en la mesa de sacudidas



Fuente: Propia.

mesa de sacudidas. Con este método se obtuvo un valor de escurrimiento que determinó la consistencia del producto ensayado. Se determinó que este valor de escurrimiento sea de 15cm, dado que con este valor se consigue una consistencia plástica que permite una trabajabilidad del producto muy adecuada (Fig. 18).

Se utilizó un molde troncocónico lubricado por dentro con un aceite desencofrante sin resinas, para luego llenarlo con la mezcla (Fig. 19). Una vez llenado, se retiró el aro superior y se enrasó el mortero al molde, quitando el exceso de material.

Luego se desenmoldó la mezcla y se dejó intacta durante 15 segundos, para luego dar 15 golpes con la mesa de sacudidas en 15 segundos más. A medida que se fueron produciendo las sacudidas, el mortero se fue asentando, esparciéndose por la mesa de sacudidas en forma de circunferencia (Fig. 20). Una vez terminados los golpes, se tomó medidas del diámetro de escurrimiento, en dos direcciones (perpendicularmente opuestos), con un pie de rey calibrado, para luego sacar la media aritmética en milímetros y obtener el resultado final de escurrimiento.

A continuación se procedió al ensayo de densidad aparente del material. Para esto, se utilizó un molde cilíndrico con capacidad de 1 litro ( $1\text{dm}^3$ ), la mesa de sacudidas y la báscula con sensibilidad de 0.1gr. Primero se llenó a la mitad, y se llevó a la mesa de sacudidas para dar 10 golpes en 10 segundos para compactar la mezcla. Luego se terminó de llenar enrasando la mezcla al molde y se golpeó 10 veces más. Luego se llevó a la báscula para pesar el contenido de mortero de un litro, conociendo el peso del

Fig. 19. Molde troncocónico y mesa de sacudidas



Fuente: Propia.

Fig. 20. Valor de escurrimiento de la mezcla obtenido con el pie de rey



Fuente: Propia.

Fig. 21. Probeta de 40 x 40 x 160mm



Fuente: Propia.

recipiente. Una vez obtenidos los datos, se continuó a llenar los encofrados para las probetas, teniendo dos moldes de 3 muestras cada uno (40 x 40 x 160mm) y dos moldes de forma cuadrada (40 x 150 x 150mm). (Fig. 21 y Fig. 22). Estos moldes se llevaron a la cámara para que fragüen durante 24 horas dentro del molde, para luego retirar los moldes y dejar secar por 27 días más.

Las densidades de los áridos se pesaron para tener la idea de lo que se está reemplazando en la mezcla de mortero, ya que el cambio es por volumen, lo que resultaría en un menor peso de la mezcla para un mismo volumen. El árido de arena fina obtuvo una densidad aparente de 1526,63 kg/m<sup>3</sup>, mientras que los plásticos reciclados de PVC y de contenido de carbono obtuvieron 973,57 kg/m<sup>3</sup> y 1352,26 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

Se compararon los resultados obtenidos para la consistencia del material resultante, el valor de escurrimiento y la densidad aparente de cada mezcla entre cada muestra con dosificaciones diferentes de plástico reciclado (de PVC y de contenido de carbono) en la mezcla y con el mortero convencional, (la mezcla con 0% de plástico reciclado).

Fig. 22. Probetas de 40 x 150 x 150mm



Fuente: Propia.

Fig. 23. Probeta de 40 x 150 x 150mm en la mesa de sacudidas



Fuente: Propia.

Tabla 4. Resultados de las pruebas de consistencia para el valor de escurrimiento (mm) y densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>) con la mezcla de hormigón fresco

Dosificaciones de plástico reciclado	Plástico reciclado: De PVC					De carbono	
	0%	10%	25%	50%	70%	25%	70%
Valor de escurrimiento (cm)	151,86	149,24	153,36	152,17	154,61	152,32	153,85
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2337,37	2187,14	2001,29	1889,44	1782,58	2086,47	2134,12

Fuente: Propia.

Una vez fabricadas las probetas con las que se realizaron los ensayos del mortero, se procedió a hacer bloques en tamaño real de este mortero aligerado. Estos bloques se comenzaron fabricando con dimensiones de 40 cm x 20 cm x 13 cm, pero dado que este bloque era muy grande y pesado para poder maniobrarlo, se hicieron bloques más pequeños de 20 cm x 13 cm x 13cm (Fig. 24). Se utilizó una bloquera, propiedad de la Escuela Politécnica Superior de Edificaciones de Barcelona, (Fig. 25).

Se fabricaron 3 bloques del mismo tipo, (de 20 cm x 13 cm x 13cm) para cada dosificación, de 25%, 50% y 70% de gránulos de plástico reciclado de PVC. La relación de cemento y árido fue de 1:3, igual que las probetas, y se utilizó arena fina, la misma usada antes. La relación agua cemento para las dosificaciones mencionadas fue de 0.55, 0.51 y 0.49 respectivamente. Se utilizó mayor cantidad de agua al ser cantidades mayores de mezcla y no se agregó fluidificante, para hacer bloques sin ningún tipo de aditivos. Se hicieron aproximadamente 16 kg de mezcla, por cada dosificación, por lo que no se pudo utilizar la amasadora sino una hormigonera, como se muestra en la Figura 26.

Estos bloques resultaron ser del tipo artesanal, siendo importante tener dos o más personas para poder fabricarlos. Esto quiere decir que podrían fabricarse por el usuario o usuarios mismos, siendo, por dar un ejemplo, una familia que construye su casa.

Los bloques que tuvieron mayores problemas para producirse fueron los de contenido de plástico reciclado de 70%, ya que no conseguía mantenerse compacto como los anteriores.

Fig. 24. Bloque de mortero de 40 cm x 20 cm x 13 cm.



Fuente: Propia.

Fig. 25. Bloquera utilizada para la producción de bloques de mortero.



Fuente: Propia.

Fig. 26. Hormigonera utilizada para la mezcla de materiales.



Fuente: Propia.

Al mezclar los materiales en la hormigonera, se pudo observar que cuando aun tenía poca agua la mezcla de mortero, se iban formando bolas pequeñas, las cuales se pensó que eran los gránulos de plástico reciclado cubiertos por el mortero, pero en realidad era el mortero que se iba formando así, por falta de agua (Fig. 27). A medida que se iba agregando agua al mortero, estas bolas fueron creciendo más y comenzaron a desaparecer.

De cada bloque grande de mortero resultaban tres bloques pequeños, ya que se utilizó un molde que dividía en tres la mezcla.

La primera mezcla que se hizo, es decir, la de 25% de agregados de plástico reciclado, fue la que se mantuvo más compacta al fabricar los bloques, ya que era mayoritariamente mortero con arena fina. Podría decirse que estos bloques se arman mejor que los otros bloques creados.

Los bloques de mortero hechos con 50% de gránulos de plástico reciclado armaron medianamente bien, sin embargo no quedaron tan compactos como los bloques de 25% de plástico. Y los bloques creados con el 70% de agregados de plástico reciclado fueron los que menos se pudieron compactar, siendo difícil su manipulación. Estos no armaban bien como los anteriores y se iban soltando debido a la cantidad de plástico que tenía, la adherencia entre los gránulos de plástico y el mortero era pobre.

Todos los bloques fueron llevados a la cámara luego de fabricados, para que sequen y luego poder estudiarlos y ver sus densidades aparentes. Se vieron los bloques frescos, (Fig. 30) y más adelante se vieron los resultados finales en seco.

Fig. 27. Mortero con 25% de plástico reciclado, formando bolas.



Fuente: Propia.

Fig. 28. Llenado de material en la bloquera.



Fuente: Propia.

Fig. 29. Extracción de bloques de la máquina.



Fuente: Propia.

Fig. 30. Bloques listos para ser llevados a la cámara (20 cm x 13 cm x 13cm).



Fuente: Propia.

### 3.2.1. Determinación de características físicas y resistencias del material

Con la investigación hecha, previa a la campaña experimental, se pudo obtener información sobre los resultados que se

podrían esperar, y el comportamiento del hormigón conteniendo agregados de plástico reciclado.

Se determinaron los resultados a esperarse luego de los 28 días de secado de las probetas, dependiendo de las funciones que estos tipos de mortero tendrían en la construcción. Si el mortero ha de utilizarse como aislante térmico y no de forma estructural deberá contener un gran volumen interno de huecos, y por consiguiente, sus resistencias mecánicas descenderán de una forma notable, así en estos hormigones la densidad aparente podría llegar a 800 kg/m<sup>3</sup> mientras que las resistencias de este no pasarían de 7MPa (7N/mm<sup>2</sup>).

El Eurocódigo 2 (1997), aun vigente, publicado por AENOR (Madrid) muestra las

Tabla 5. Clases de densidades de cálculo correspondientes a hormigones de árido ligero según la Norma Experimental ENV 206.

Clases de densidad (kh/m <sup>3</sup> )	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Densidad seca	901-1000	100 -1200	1201-1400	1401-1600	1601-1800	1801-2000
Densidad de cálculo (hormigón en masa)	1050	1250	1450	1650	1850	2050

Fuente: Eurocódigo 2, Capítulo 1-4. AENOR (1997).

Tabla 6. Clases de hormigón y resistencias características a compresión ( $f_{ck}$ ) del hormigón de árido ligero (N/mm<sup>2</sup>)\*.

Tipo	LC 12/15	LC 16/20	LC 20/25	LC 25/30	LC 30/37	LC 35/45	LC 40/45	LC 45/55	LC 50/60
$F_{lck}$	12	16	20	25	30	35	40	45	50

Fuente: Eurocódigo 2, Capítulo 1-4. AENOR (1997).

\* 1 N/mm<sup>2</sup> = 1 MPa

LC 12/15: La primera cifra significa la resistencia característica del cilindro y la segunda la del cubo.

reglas generales para el hormigón de árido ligero de textura cerrada (Capítulo 1-4). Para obtener hormigones aligerados es necesario que su densidad sea menor a  $2000 \text{ kg/m}^3$ , por lo que la mezcla de mortero hecha con 10% de agregados de plástico reciclado de PVC no cumple con esta primera premisa. La mezcla de 25% de plástico cumple estando en el límite y las mezclas con 50% y 70% sí cumplen. Las mezclas hechas con agregados de plástico reciclado con contenido de carbono no cumplen con esta premisa, así que no llegan a ser hormigones ligeros.

El hormigón convencional tiene aproximadamente una resistencia a compresión ( $f_c$  28) de 31,6 MPa y una resistencia a tracción indirecta ( $f_t$  28) de 2,8 MPa, según las normas UNE 83-304 y UNE 83-306 respectivamente.

Basándonos en el Eurocódigo y el reglamento, los hormigones ligeros con resistencias a compresión adecuadas para funcionar estructuralmente en edificios van desde los tipos de hormigón LC 25/30 y LC 30/37 en adelante. Los hormigones inferiores a estos pueden funcionar en elementos no estructurales, o como morteros o pavimentos.

Acerca del comportamiento térmico de los hormigones aligerados, este se ve directamente ligado a su densidad. En cualquier caso, el comportamiento térmico de los hormigones ligeros es siempre superior al de otros hormigones. El hormigón convencional tiene una conductividad térmica entre 1,00 y 1,40  $\text{Kcal/h}\cdot\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ , ( $1,16 \text{ W/m}\cdot\text{K} - 1,63 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) – en condiciones de humedad natural del 3% en peso –. La conductividad de un hormigón ligero de la misma resistencia (LC 25/30) es de tan sólo 0,45 a

0,50  $\text{Kcal/h}\cdot\text{m}\cdot^\circ\text{C}$  ( $0,52 \text{ W/m}\cdot\text{K} - 0,58 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) en las mismas condiciones.

Los hormigones que tienen una densidad de  $500 - 800 \text{ kg/m}^3$ , es decir, que son muy ligeros, se utilizan con fines aislantes, ya que tienen una conductividad térmica de 0,10 a 0,15  $\text{Kcal/h}\cdot\text{m}\cdot^\circ\text{C}$  ( $0,12 \text{ W/m}\cdot\text{K} - 0,17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ).

En cuanto a las consistencias, densidades y pesos, se observó que el valor de escurrimiento que debían tener las mezclas ensayadas en la mesa de sacudidas era de 15cm, para que pueda ser un hormigón de consistencia plástica, algo fluida, de cierta docilidad y trabajable. Se observó que la densidad de un hormigón convencional estructural es de  $2400 \text{ kg/m}^3$ , y un mortero convencional para utilizar en pavimentos y como recubrimiento puede variar entre 2240 y  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Un hormigón liviano tiene un peso específico menor a  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Un hormigón liviano estructural, conseguido empleando agregados livianos o provocando la formación de burbujas en la mezcla, puede tener una densidad de  $1700 \text{ kg/m}^3$  y una resistencia sobre 25 MPa.

Los bloques de mortero a escala real que se fabricaron en la campaña mostraron que sí se pueden fabricar con áridos de plástico reciclado. Los bloques con una dosificación de 25% de agregados de plástico mostraron una buena consistencia mientras estaban frescos (Fig. 31). Los bloques con 50% de plástico reciclado también se pudieron armar como un bloque macizo (Fig. 32). Sin embargo, los bloques con 70% mostraron no ser lo suficientemente sólidos. Se armaron como bloques, pero se deformaron más que los otros (Fig. 33).

*Fig. 31. Bloques de mortero fresco con 25% de plástico reciclado.*



*Fuente: Propia.*

*Fig. 32. Bloques de mortero fresco con 50% de plástico reciclado*



*Fuente: Propia.*

*Fig. 33. Bloques de mortero fresco con 70% de plástico reciclado*



*Fuente: Propia.*

*Fig. 34. Bloques de mortero con 25% de plástico reciclado después de 24 horas*



*Fuente: Propia.*

*Fig. 35. Bloques de mortero con 50% de plástico reciclado después de 24 horas*



*Fuente: Propia.*

*Fig. 36. Bloques de mortero con 70% de plástico reciclado después de 24 horas*



*Fuente: Propia.*

### 3.2.2. Probetas para Ensayos

Una vez transcurridos los 28 días en los que se dejaron las probetas secando y fraguando en la cámara húmeda del laboratorio de la EPSEB, se procedió a realizar los ensayos pertinentes, para determinar las características y comportamientos de este material de mortero con plástico, y así, poder plantear usos distintos para cada mortero de diferentes dosificaciones de gránulos de plástico reciclado.

#### 3.2.2.1. Reología:

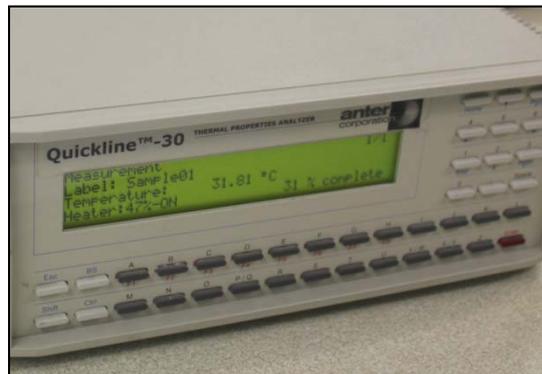
Estos ensayos se realizaron cuando las mezclas de mortero estaban frescas, las cuales ya se explicaron previamente. Se observaron los resultados necesarios para poder continuar con el proceso de llenado de los encofrados, fraguado y secado de las probetas.

#### 3.2.2.2. Conductividad térmica:

Las probetas utilizadas para este ensayo fueron las dos creadas de 40 x 150 x 150mm. Se utilizó el equipo de medida de propiedades térmicas portátil, modelo Quickline -30 de la casa Anter Corporation (Fig. 37 y 38). Se colocó el sensor sobre la cara más plana de la probeta y esta a su vez se apoyó sobre un soporte para no tocar el suelo. Una a una el sensor térmico fue tomando las medidas de cada muestra en el rango de tiempo de 10 a 15 minutos (Fig. 39). Se tomaron medidas de: coeficiente de

conductividad térmica ( $\lambda$ ), calor específico ( $c_p$ ) y difusividad térmica ( $\alpha$ ). Se registraron los resultados y se compararon por cada dosificación.

Fig. 37. Equipo de medida de propiedades térmicas



Fuente: Propia.

Fig. 38. Método utilizado para la medición de la conductividad térmica



Fuente: Propia.

Fig. 39. Toma de medidas de las probetas con el sensor



Fuente: Propia.

### 3.2.2.3. Módulo de elasticidad:

Se realizaron las pruebas para conseguir el módulo de elasticidad (MOE), mediante frecuencia de ondas sonoras producidas por un impulso, el cual mide la elasticidad del material. Primero se procedió a secar las probetas de 40 x 40 x 160mm en un horno a 50 °C por tres días para que no estén húmedas luego de haber estado en la cámara húmeda fraguando (Fig. 40).

Posteriormente se realizó el ensayo, el cual no es destructivo, que permite la determinación del módulo de elasticidad de las probetas mediante la determinación de la velocidad de ondas sonoras provocadas por un impulso. Se analizaron las muestras con un software determinado, el cual percibía todas las perturbaciones mecánicas producidas con un pequeño martillo de madera con la ayuda de un micrófono (de rango de frecuencias de 20 Hz a 20 KHz y sensibilidad 60 +/- 3 dB e impedancia de 600 Ohm), conectado al ordenador. Este micrófono indicó la frecuencia de resonancia fundamental (Fig. 41). Las probetas se apoyaron sobre unos soportes de poliestireno extruido, de 35 kg/m<sup>3</sup>, (similar al indicado por la norma), de sección triangular, medidos con un pie de rey a 36.18 mm de los bordes. Se tomaron medidas con el pie de rey, de las cuatro longitudes de cada probeta y dos espesores de cada cara. Luego se produjeron pequeños golpes en tres caras de las probetas, en el lado llamado "A", siendo la cara de canto, (sentido longitudinal), luego en la cara lateral superior "B" y finalmente en la cara lateral opuesta "C", (sentido transversal) (Fig. 42). Se anotaron los resultados arrojados por el micrófono y el software.

Se tomaron como normas de referencia básica las siguientes:

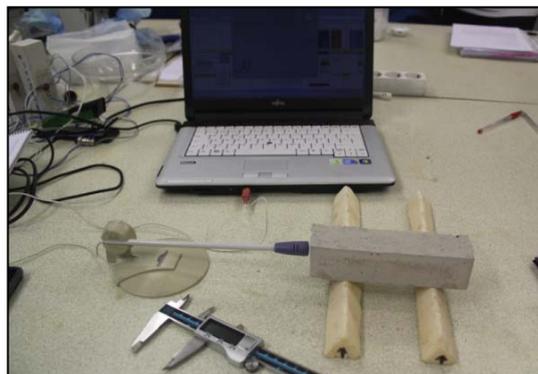
- UNE-EN-14146. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental, 2004.
- UNE-EN-ISO-12680-1. Métodos de ensayo para productos refractarios. Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso, 2007.

Fig. 40. Probetas secando a 50 °C en el horno para poder realizar los ensayos



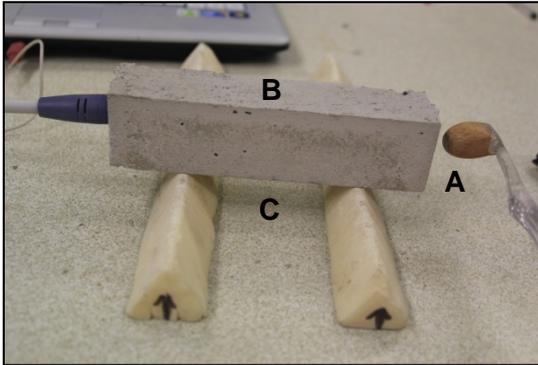
Fuente: Propia.

Fig. 41. Equipos para el ensayo MOE.



Fuente: Propia.

Fig. 42. Caras de la probeta donde se realizaron los golpes.



Fuente: Propia.

Luego se realizó el ensayo de ultrasonidos, también para conocer el módulo de elasticidad de las probetas según la trayectoria de la propagación de las ondas de ultrasonidos. Se realiza este ensayo para poder corroborar datos ya que el mortero es un material heterogéneo y existe una alta probabilidad de error al obtener los datos.

Al procesar las ondas de ultrasonido se conoce su propagación en el interior y así se puede conocer si el material posee discontinuidades (ya que estas generan resistencias, y a mayores discontinuidades mayor será el tiempo de propagación de ultrasonidos). Así se puede detectar si el material es poroso o sólido. El módulo de Young es calculado en función de la longitud de la probeta y la velocidad de onda. Según la velocidad de la onda, la distancia recorrida por este es:

$$s = V \cdot T / 2 \quad \text{donde;}$$

$s$  = Espesor

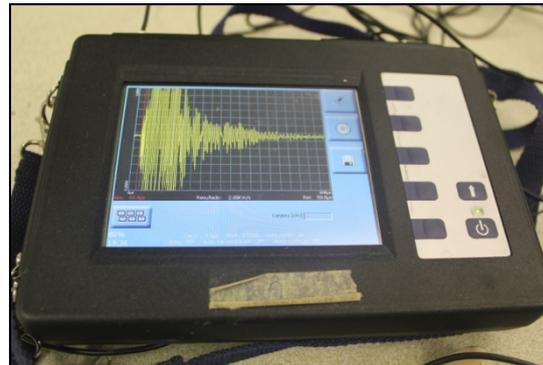
$V$  = Velocidad del sonido en el material

$T$  = Tiempo en segundos

Para este ensayo no destructivo se utilizó el equipo de ultrasonidos de la marca Matest (Fig. 43). Se colocaron en cada uno

de los cantos de cada probeta un emisor y un receptor de ondas de ultrasonido, aplicando un gel de pH neutro en las dos caras de la probeta para un mejor contacto (Fig. 44). Se utilizaron soportes para apoyar horizontalmente las probetas para evitar interferencias de ondas sonoras ambientales. Se calculó la velocidad de propagación de ultrasonidos y mediante la formulación adecuada, teniendo en cuenta la densidad, dimensiones y coeficiente de Poisson del material, se obtuvo el MOE del sentido longitudinal de la mezcla estudiada. Luego se anotaron los resultados obtenidos para ser comparados entre las distintas mezclas.

Fig. 43. Equipo de ultrasonidos de marca Matest.



Fuente: Propia.

Fig. 44. Ensayo de ultrasonido para conocer el módulo de elasticidad.



Fuente: Propia.

### 3.2.2.4. Resistencias a flexo tracción:

El siguiente ensayo que se realizó fue el de flexo tracción. Se llevaron seis probetas prismáticas de cada dosificación a la máquina de flexo tracción de la casa Wykeham Farrance, con células de carga máxima en este caso de 5000 kg. Esta máquina se conectó a un display digital que registró las cargas máximas. La velocidad de carga se programó para que sea entre 10 N/s y 30 N/s (Fig. 45). Se colocó cada probeta centrada con la carga y luego se bajó el pistón de manera manual hasta que quedó a ras de esta. Luego se taró a cero en el display para poder comenzar, y se procedió a aplicar carga (Fig. 46). Las probetas se partieron en dos al fallar, (Fig. 47) y se anotaron los resultados de resistencia máxima antes de fallar.

Para realizar estos ensayos se siguieron las especificaciones de la norma UNE-EN- 1015-11.

Fig. 45. Máquina de ensayos de resistencias a flexo tracción.



Fuente: Propia.

Al finalizar el ensayo quedan dos piezas de cada probeta (Fig. 48), las cuales se utilizaron en el ensayo de resistencias a compresión, salvo por dos de las mitades que fueron utilizadas en el ensayo de porosidad y densidad.

Fig. 46. Probeta siendo ensayada a resistencias a flexo tracción.



Fuente: Propia.

Fig. 47. Probeta ensayada a resistencias a flexo tracción que ya ha fallado.



Fuente: Propia.

Fig. 48. Probetas ensayadas a flexo tracción.



Fuente: Propia.

Fig. 49. Probeta partida con dosificación de 0% de agregado de plástico reciclado de PVC.



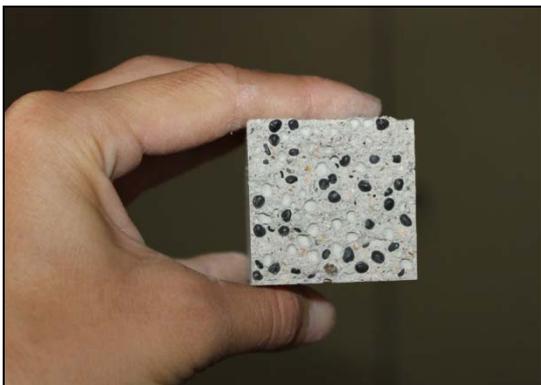
Fuente: Propia.

Fig. 50. Probeta partida con dosificación de 10% de agregado de plástico reciclado de PVC.



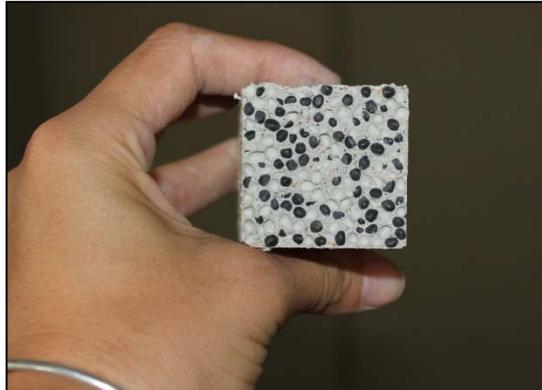
Fuente: Propia.

Fig. 51. Probeta partida con dosificación de 25% de agregado de plástico reciclado de PVC.



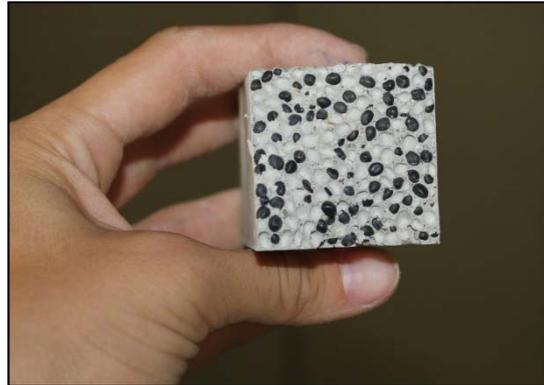
Fuente: Propia.

Fig. 52. Probeta partida con dosificación de 50% de agregado de plástico reciclado de PVC.



Fuente: Propia.

Fig. 53. Probeta partida con dosificación de 70% de agregado de plástico reciclado de PVC.



Fuente: Propia.

Fig. 54. Probeta partida con dosificación de 25% de agregado de plástico reciclado con contenido de carbono.



Fuente: Propia.

*Fig. 55. Probeta partida con dosificación de 70% de agregado de plástico reciclado con contenido de carbono.*



*Fuente: Propia.*

### **3.2.2.5. Resistencias a compresión:**

Las mitades obtenidas del ensayo de flexo tracción fueron utilizadas para ser ensayadas bajo esfuerzos de compresión. Se utilizó una prensa diferente que la del ensayo de flexo tracción, también de la casa Wykeham Farrance. A esta prensa se le colocó una célula de carga máxima de 10000 kg. De igual manera que en el ensayo anterior, se conectó un display digital que registró las cargas máximas. La velocidad de carga se programó para que sea entre 10 N/s y 50 N/s (Fig. 56). El pistón tiene el mismo ancho que el de las probetas utilizadas, y estas se colocaron centradas con respecto a esta superficie. Primero se bajó el pistón de manera manual hasta que este toque la probeta, sin carga, y luego se taró a cero en el display para poder comenzar el ensayo (Fig. 57). Se inició el ensayo aplicando la carga y cuando la probeta superó su límite elástico el display recogió la carga máxima. (Fig. 58 – 64). Estos resultados fueron anotados.

Para realizar estos ensayos se siguieron las especificaciones de la norma UNE-EN- 1015-11.

*Fig. 56. Máquina de ensayos de resistencias a compresión.*



*Fuente: Propia.*

*Fig. 57. Probeta siendo ensayada a resistencias a compresión.*



*Fuente: Propia.*

*Fig. 58. Probeta con dosificación de 0% de plástico reciclado de PVC fisurada por compresión.*



Fuente: Propia.

*Fig. 61. Probeta con dosificación de 50% de plástico reciclado de PVC fisurada por compresión.*



Fuente: Propia.

*Fig. 59. Probeta con dosificación de 10% de plástico reciclado de PVC fisurada por compresión.*



Fuente: Propia.

*Fig. 62. Probeta con dosificación de 70% de plástico reciclado de PVC fisurada por compresión.*



Fuente: Propia.

*Fig. 60. Probeta con dosificación de 25% de plástico reciclado de PVC fisurada por compresión.*



Fuente: Propia.

*Fig. 63. Probeta con dosificación de 25% de plástico reciclado con contenido de carbono fisurada por compresión.*



Fuente: Propia.

*Fig. 64. Probeta con dosificación de 70% de plástico reciclado con contenido de carbono fisurada por compresión.*



*Fuente: Propia.*

*Fig. 65. Probetas ensayadas a compresión.*



*Fuente: Propia.*

### **3.2.2.6. Densidad aparente y relativa e índice de porosidad:**

Se siguió la norma UNE-EN 1015-10, y se complementó el método de realización para poder obtener no solo la densidad aparente – que es la que se consigue con ese método – si no también la densidad relativa y el índice de porosidad. También se tomó como referencia la norma de piedra natural mencionada anteriormente, UNE-EN-14146.

Para llevar a cabo este ensayo se utilizó una campana de vacío con sistema de

llenado de agua desmineralizada y conectada a un vacuómetro, además se usó una bomba de vacío y una báscula con sensibilidad de 0.01g y pesa hidrostática (Fig. 66). Se utilizaron dos piezas por cada mezcla de mortero, que quedaron del ensayo de flexo tracción cuando se partieron por la mitad, que no se utilizaron en el ensayo de resistencias a compresión, (son dos piezas de distintas probetas). Primero se procedió a pesar las muestras para obtener el peso seco y luego estas fueron introducidas en la campana de vacío, en dos niveles, separadas por una malla (Fig. 67). Se activó la bomba de vacío, la cual permitió crear una depresión atmosférica de hasta 8 mbar en la campana. Se mantuvo así por el período de dos horas, para poder llegar a esta depresión, y una vez transcurrido ese tiempo se activó el sistema de llenado de agua, el cual inundó los dos niveles de muestras lentamente (Fig. 68). Este llenado duró aproximadamente cuarenta minutos. Luego de que el agua cubrió por completo las muestras, se cerró el agua y se dejó la bomba funcionando por dos horas y media con las piezas dentro del agua. Con este sistema se consigue eliminar el aire que existe en la red porosa accesible, de tal manera que se pueda llenar de agua completamente. Esto sirve para determinar la densidad aparente y relativa y el índice de porosidad.

Luego del tiempo transcurrido se procedió a pesar las muestras de dos formas; primero se pesó cada muestra con la báscula conteniendo sobre ella un envase con agua, y una malla la cual se sostenía desde arriba, para colocar ahí cada muestra y que pueda flotar en el agua sin tocar las paredes del

envase. La báscula se taró a cero y se colocó cada pieza para conseguir el peso hidrostático (Fig. 69). Luego se pesó cada pieza independiente sobre la báscula, pasándola previamente por un trapo húmedo, para obtener el peso saturado (Fig. 70 y 71). Se anotaron los pesos y con estos datos se pudo conseguir las densidades aparente y relativa y el índice de porosidad.

Fig. 66. Equipo para el ensayo de densidad aparente y relativa e índice de porosidad.



Fuente: Propia.

Fig. 67. Campana de vacío conteniendo las muestras a ser ensayadas.



Fuente: Propia.

Fig. 68. Llenado de agua desmineralizada en la campana de vacío.



Fuente: Propia.

Fig. 69. Método para conseguir el peso hidrostático de cada pieza ensayada.



Fuente: Propia.

Fig. 70. Método para conseguir el peso saturado de cada pieza ensayada.



Fuente: Propia.

*Fig. 71. Método para conseguir el peso saturado de cada pieza ensayada.*



*Fuente: Propia.*

Una vez finalizados los ensayos y la campaña experimental que se llevó a cabo en el laboratorio de materiales de la Escuela Politécnica Superior de Edificaciones de Barcelona (EPSEB), se procedió a observar y estudiar los resultados obtenidos para realizar el análisis pertinente y poder llegar a las conclusiones. Todos los equipos utilizados pertenecen al laboratorio de la EPSEB y las muestras creadas permanecen ahí.



## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Características físicas y resistencias obtenidas

Se analizaron las siete mezclas de dosificaciones; de plástico reciclado de PVC: 0%, 10%, 25%, 50% y 70% y de plástico con contenido de carbono: 25% y 70% según cada ensayo realizado, a los 28 días de tiempo de fraguado, comparándolas entre sí para luego poder obtener las conclusiones. A continuación se exponen los datos obtenidos en la campaña experimental.

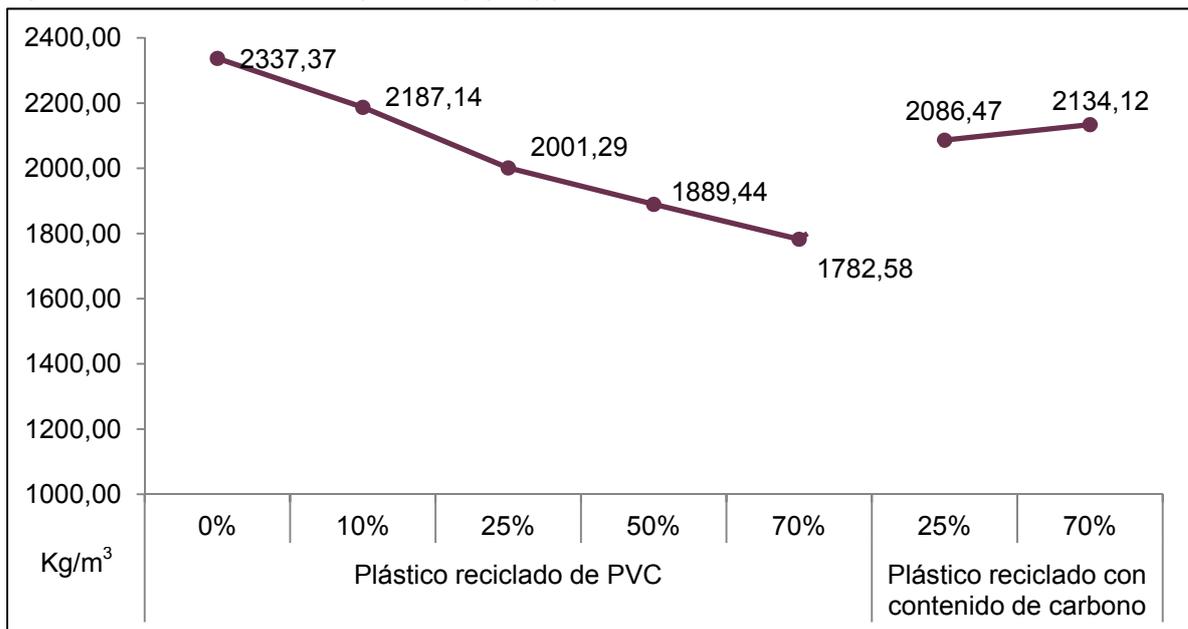
#### 4.1.1. Reología

Como se determinó en la campaña experimental, en el punto 3.2., Tabla 4, se obtuvieron pastas de mortero con las características anotadas, de valor de

escurrimiento de 150 mm (de diámetro), según la norma UNE-EN 1015-3.

En cuanto a la densidad aparente del mortero fresco, se obtuvo para las mezclas de 0%, 10%, 25%, 50% y 70% de plástico reciclado de PVC los valores de 2337.37 kg/m<sup>3</sup>, 2187.14 kg/m<sup>3</sup>, 2001.29 kg/m<sup>3</sup>, 1889.44 kg/m<sup>3</sup> y 1782.58 kg/m<sup>3</sup> respectivamente y para las mezclas de 25% y 70% de plástico reciclado con contenido de carbono, valores de 2086.47 kg/m<sup>3</sup> y 2134.12 kg/m<sup>3</sup> respectivamente (Fig. 72). Se puede apreciar que el decrecimiento de la densidad aparente en la gráfica es casi lineal en el caso del plástico de PVC, a medida que fue aumentando el porcentaje de plástico. En el caso del plástico con carbono, al ser este un material pesado no aligera el peso, por el contrario, lo aumenta.

Fig. 72. Gráfica de densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>) para las mezclas de mortero fresco.



Fuente: Propia.

#### 4.1.2. Conductividad térmica

Los resultados a comparar, como muestra la Tabla 7, son el coeficiente de conductividad térmica ( $\lambda$ ), el calor específico ( $c_p$ ) y la difusividad térmica ( $\alpha$ ). Se basó en la norma UNE-EN 1745 para la conductividad térmica. Se puede observar que el mortero convencional posee características aislantes comunes, y es tan solo medianamente aislante, mientras que a medida que se aumenta el porcentaje de plástico, el

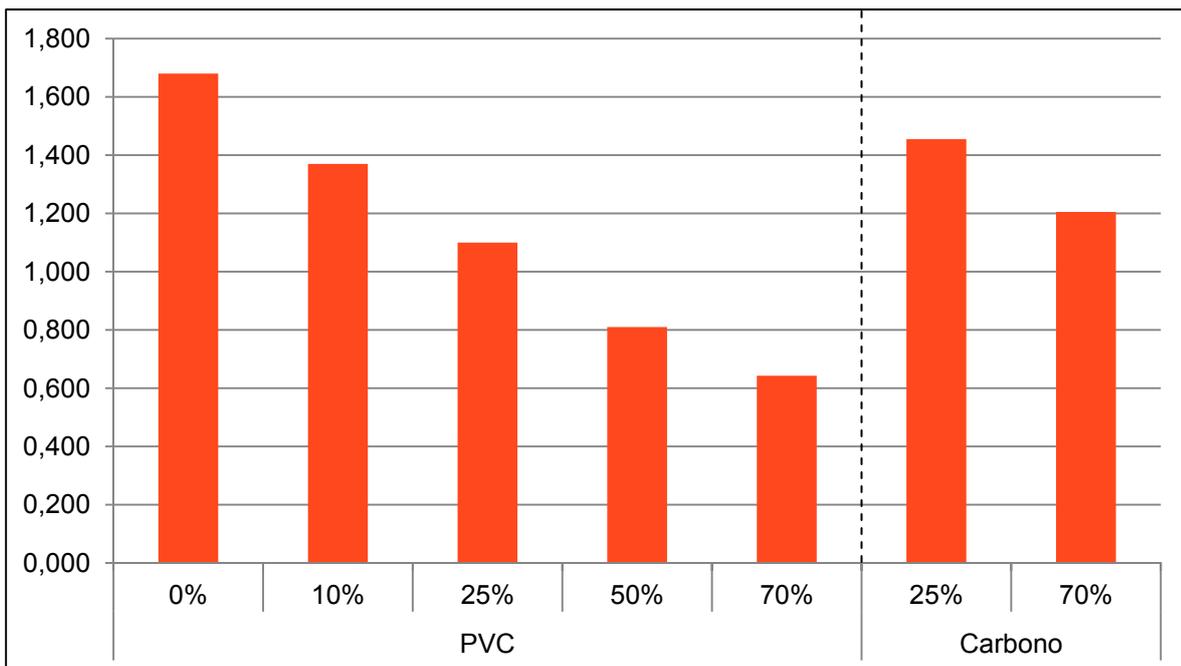
coeficiente de conductividad térmica disminuye, lo que lo hace mejor aislante térmico (Fig. 73). El calor específico indica la mayor o menor dificultad que presenta un material para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor. En este caso, decrece a medida que aumenta el porcentaje de plástico y que se hace menos denso. Esto quiere decir que es más fácil incrementar la temperatura de los morteros con mayor cantidad de plástico, con menos energía calorífica (Fig. 74).

Tabla 7. Resultados de ensayo de propiedades térmicas.

Propiedades térmicas	Dosificación de plástico reciclado						
	PVC					Carbono	
	0%	10%	25%	50%	70%	25%	70%
Conductividad térmica ( $\lambda$ ) (W/m.K)	1,680	1,370	1,100	0,810	0,643	1,455	1,205
Calor específico ( $c_p$ ) (J/m <sup>3</sup> .K)	1,77E+06	1,68E+06	1,64E+06	1,62E+06	1,60E+06	1,62E+06	1,57E+06
Difusividad térmica ( $\alpha$ ) (m <sup>2</sup> /s)	9,50E-07	8,21E-07	6,88E-07	5,08E-07	3,97E-07	8,97E-07	7,72E-07

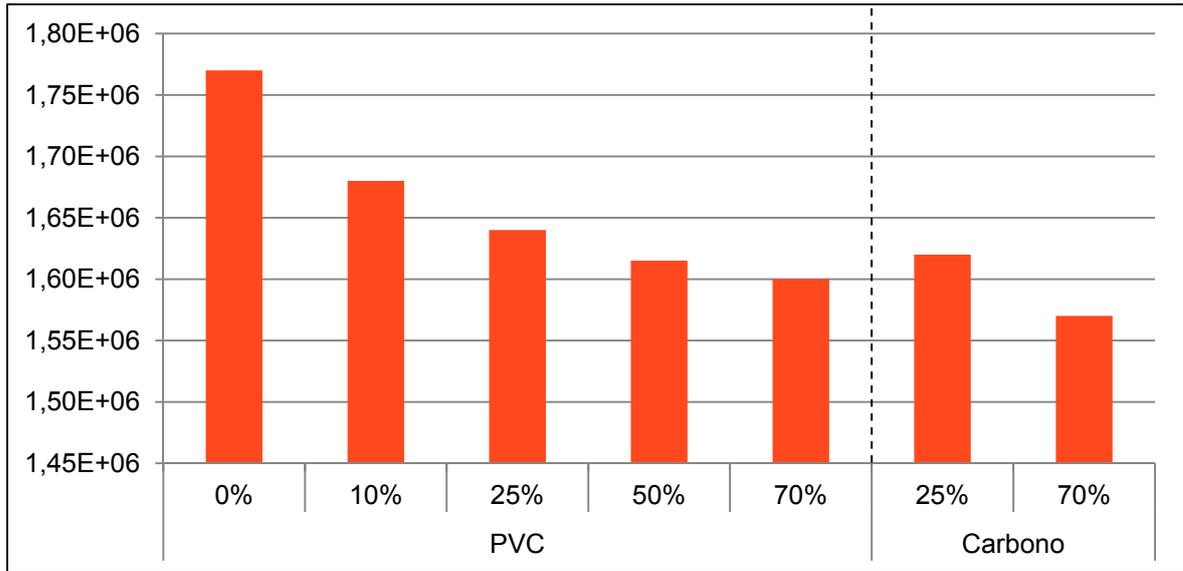
Fuente: Propia.

Fig. 73. Gráfica de Conductividad térmica ( $\lambda$ ) (W/m.K).



Fuente: Propia.

Fig. 74. Gráfica de Calor específico ( $c_p$ ) ( $J/m^3 \cdot K$ ).

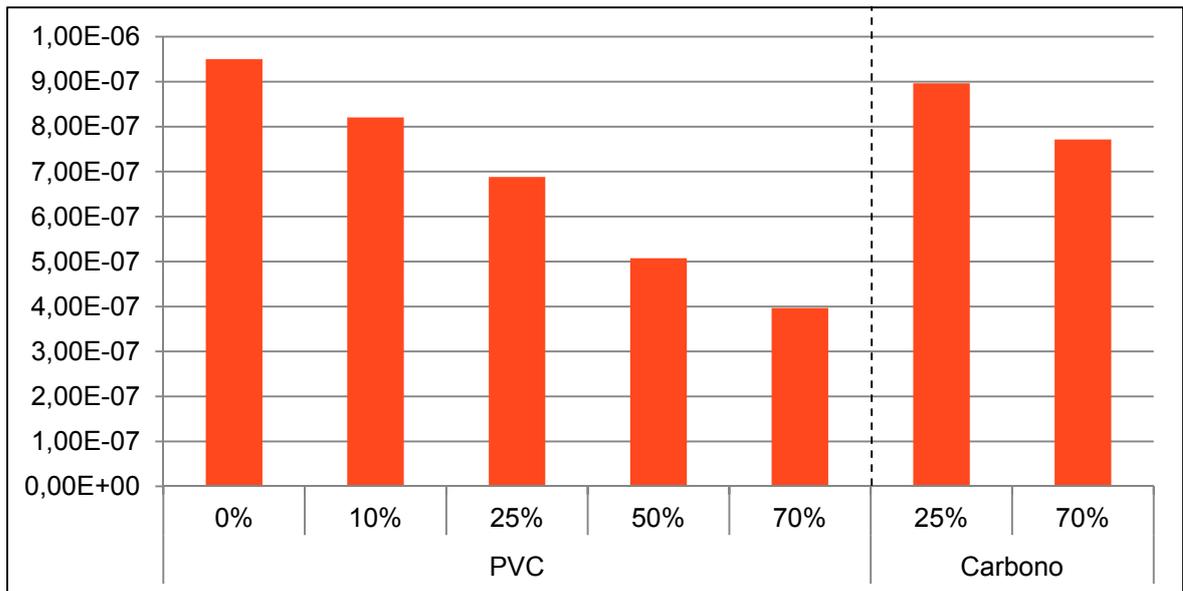


Fuente: Propia.

La difusividad térmica (Fig. 75) caracteriza la rapidez con la que varía la temperatura del material ante una variación de temperatura en la superficie. Se puede observar que a medida que se incrementa el plástico el tiempo de variación disminuye. Esto quiere decir que el mortero con mayor cantidad de plástico mantiene mejor su temperatura mientras el exterior cambia, es

decir, posee la capacidad de variar su temperatura más lentamente que el medio que lo rodea. Esto es conveniente para una vivienda que se encuentra en un lugar con un clima que tiene grandes oscilaciones de temperatura, ya que el interior se podría aislar del exterior, manteniendo su temperatura.

Fig. 75. Gráfica de Difusividad térmica ( $\alpha$ ) ( $m^2/s$ ).



Fuente: Propia.

#### 4.1.3. Módulo de Elasticidad

Es importante conocer el módulo de elasticidad de este material para determinar su forma de trabajar en los elementos constructivos en los que va a formar parte.

En el ensayo realizado mediante la determinación de la velocidad de ondas sonoras provocadas por un impacto, la intención principal fue la obtención del modo fundamental de la frecuencia propia de resonancia, mediante un pequeño golpe y la recogida de la señal o espectro de frecuencias que este golpe produce. Se tomó como referencia la norma UNE-EN-ISO 12680-1. Los datos obtenidos fueron introducidos a una tabla de Excel (proporcionada por Antonia Navarro Ezquerro del laboratorio de materiales de la EPSEB) que arrojó los resultados del módulo de elasticidad. Se puede observar en la Tabla 8 los módulos de elasticidad a flexión y longitudinales.

La fórmula que se utilizó para el ensayo de ultrasonido fue la siguiente:

$$MOE_{us} = \rho (1+\mu) (1-2\mu) v_{us}^2 / (1-\mu)$$

Donde;

$\rho$  = Densidad

$v_{us}$  = Velocidad de paso de ultrasonido

$\mu$  = Coeficiente de Poisson

Cuanto mayor es el módulo de elasticidad de los áridos, mayor es el módulo de elasticidad del mortero. La forma de los áridos y su textura superficial afectan también al módulo de elasticidad debido a su influencia en la formación de micro fisuras. En este caso, a medida que el plástico reciclado se incrementa en la mezcla este módulo va descendiendo. Esto se debe a que el árido, en este caso el plástico, no tiene una de las mejores adherencias a la mezcla de mortero, y a medida que este aumenta, se va perdiendo esta elasticidad.

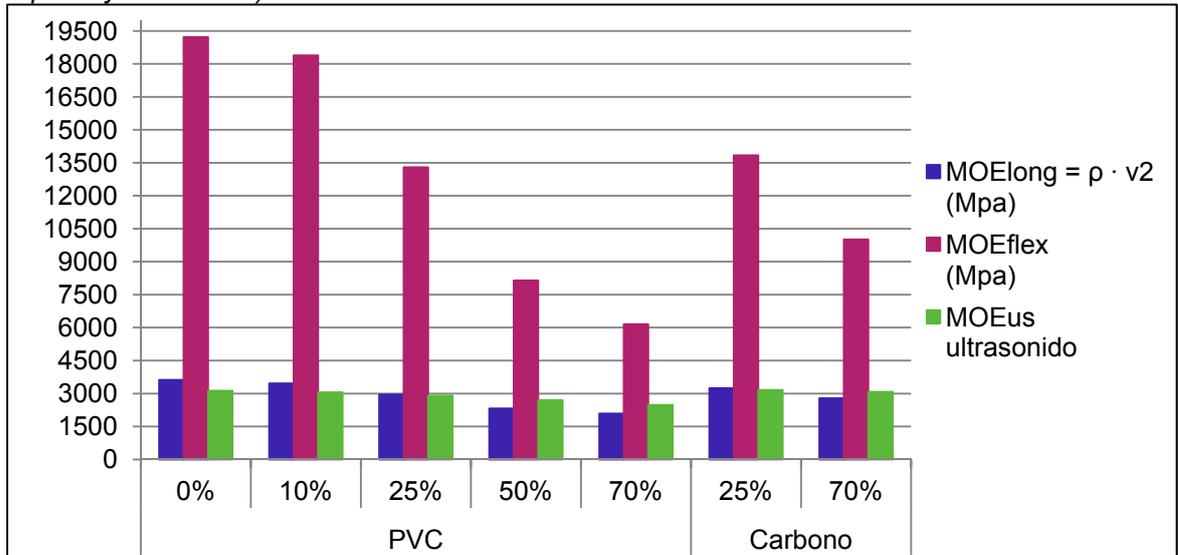
Se realizaron dos ensayos distintos para el módulo de elasticidad longitudinal, el de impacto y el de ultrasonido, debido a la heterogeneidad que supone este material, y por eso existe la probabilidad de error al obtener los datos. Si bien no muestran las mismas cifras, son similares y ambos muestran el decrecimiento del módulo con el aumento del porcentaje plástico reciclado.

Tabla 8. Resultados de ensayo de Módulo de elasticidad (MOE).

Probetas		Por impacto		Ultrasonido
Plástico reciclado	%	$MOE_{long} = \rho \cdot v^2$ (Mpa)	$MOE_{flex}$ (Mpa)	$MOE_{us}$
PVC	0%	3625	19225	3127
	10%	3459	18387	3052
	25%	2956	13295	2906
	50%	2320	8143	2700
	70%	2089	6156	2483
Carbono	25%	3241	13843	3161
	70%	2783	10013	3075

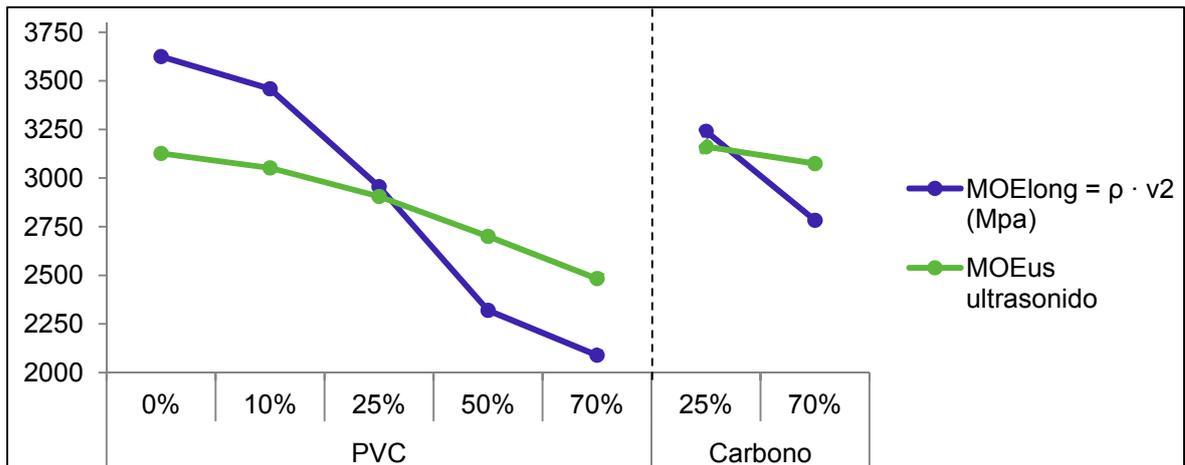
Fuente: Propia.

Fig. 76. Gráfica mostrando los módulos de elasticidad a flexión y longitudinales (obtenidos por impacto y ultrasonido) de cada mezcla.



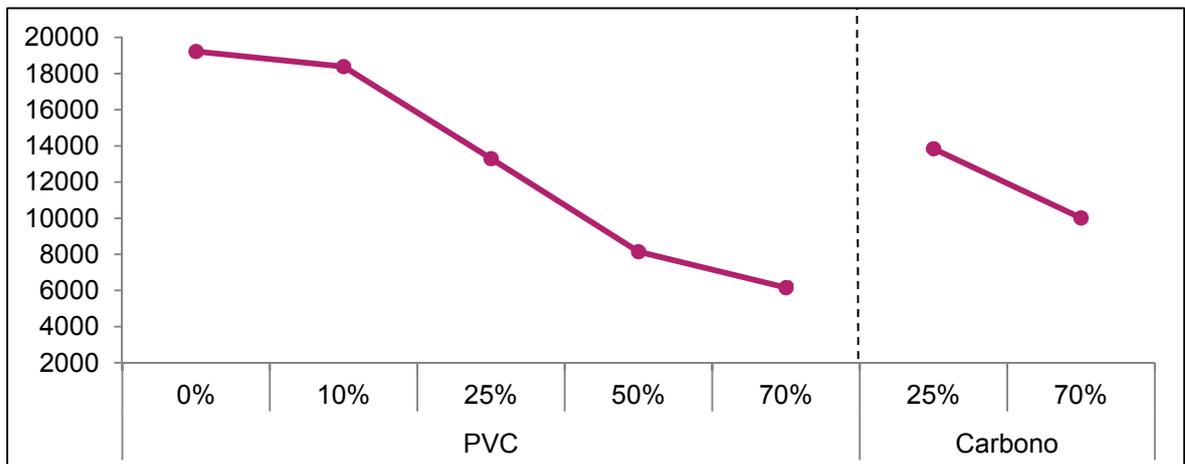
Fuente: Propia.

Fig. 77. Gráfica mostrando el módulo de elasticidad longitudinal de cada mezcla (MPa).



Fuente: Propia.

Fig. 78. Gráfica mostrando el módulo de elasticidad de flexión de cada mezcla (MPa).



Fuente: Propia.

#### 4.1.4. Resistencias a flexo tracción

Las resistencias obtenidas a flexo tracción se obtuvieron con la sección de las probetas a ensayarse y la carga aplicada en kilogramos, basándose en la norma UNE-EN 101511. Los resultados de las seis probetas ensayadas fueron promediados para obtener la media del valor de la resistencia a flexo tracción. Se muestran las cargas resistidas promedio y la media del resultado final en la Tabla 9, según cada dosificación. Se puede

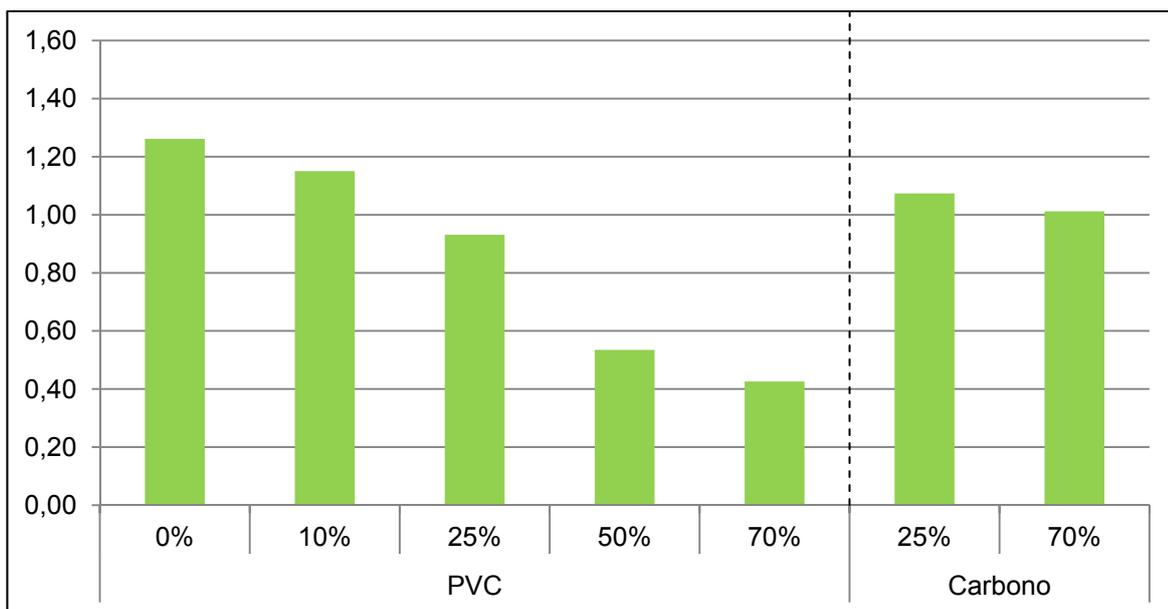
observar que a medida que las mezclas contienen mayor cantidad de plástico reciclado la resistencia disminuye, va perdiendo propiedades mecánicas (Fig. 79). Las probetas con agregado de plástico de carbono resistieron más que las de PVC, esto ocurre porque tienen una mayor densidad, mientras que las primeras son más ligeras y por esto menos resistentes a las cargas de flexo tracción.

Tabla 9. Resultados de ensayo de resistencias a flexo tracción ( $1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa} = 10,19 \text{ kgf/cm}^2$ ).

Probetas		Anchura (mm)	Espesor (mm)	Sección (mm <sup>2</sup> )	Carga (kg)	Tensión rotura (N/mm <sup>2</sup> ) (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
PVC	0%	40	40	1600	206,00	<b>1,26</b>	<b>12,86</b>
	10%	40	40	1600	187,80	<b>1,15</b>	<b>11,72</b>
	25%	40	40	1600	152,00	<b>0,93</b>	<b>9,49</b>
	50%	40	40	1600	87,30	<b>0,53</b>	<b>5,45</b>
	70%	40	40	1600	69,50	<b>0,43</b>	<b>4,34</b>
Carbono	25%	40	40	1600	175,3	<b>1,07</b>	<b>10,94</b>
	70%	40	40	1600	165,2	<b>1,01</b>	<b>10,31</b>

Fuente: Antonia Navarro Ezquerria, Laboratorio de Materiales de la EPSEB

Fig. 79. Gráfica mostrando las tensiones de rotura para la resistencia a flexo tracción (N/mm<sup>2</sup>).



Fuente: Propia.

#### 4.1.5. Resistencias a compresión

Las resistencias a compresión se obtuvieron de igual manera que en el ensayo de flexo tracción, con la sección de las piezas y la carga aplicada en kilogramos, basándose en la norma UNE-EN 101511. Los resultados de las diez piezas ensayadas (ya que se utilizaron las probetas partidas en dos por el ensayo de resistencias a flexo tracción) fueron promediados para obtener la media del valor de la resistencia. Se muestran las cargas resistidas promedio y la media del resultado final en la Tabla 10. Se observó

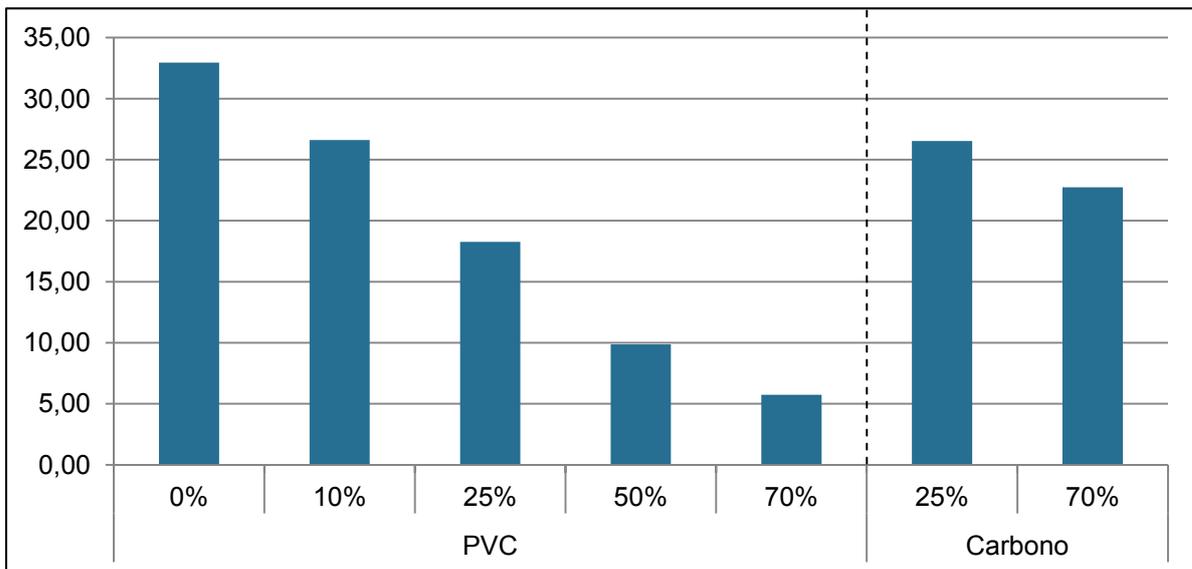
que a mayor porcentaje de plástico en la mezcla, la resistencia fue decreciendo notablemente, obteniendo una pobre resistencia para el mortero de 70% de plástico reciclado (Fig. 80). A medida que el mortero se hace más ligero va perdiendo cualidades mecánicas. Durante el ensayo se observó además, que a medida que se iban ensayando las probetas con mayor cantidad de plástico, las fallas iban siendo cada vez menos notorias, es decir, se mantenía la pieza más unida y sólida luego de fallar, lo que lo hace un material más dúctil.

Tabla 10. Resultados de ensayo de resistencias a compresión ( $1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa} = 10,19 \text{ kgf/cm}^2$ ).

Probetas		Anchura (mm)	Espesor (mm)	Sección (mm <sup>2</sup> )	Carga (kg)	Tensión rotura (N/mm <sup>2</sup> ) (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
PVC	0%	40	40	1600	5380,30	<b>32,95</b>	<b>335,80</b>
	10%	40	40	1600	4344,30	<b>26,61</b>	<b>271,14</b>
	25%	40	40	1600	2981,70	<b>18,26</b>	<b>186,10</b>
	50%	40	40	1600	1611,30	<b>9,87</b>	<b>100,57</b>
	70%	40	40	1600	936,60	<b>5,74</b>	<b>58,46</b>
Carbono	25%	40	40	1600	4330,80	<b>26,53</b>	<b>270,30</b>
	70%	40	40	1600	3711,50	<b>22,73</b>	<b>231,65</b>

Fuente: Antonia Navarro Ezquerro, Laboratorio de Materiales de la EPSEB

Fig. 80. Gráfica mostrando las tensiones de rotura para la resistencia a compresión (N/mm<sup>2</sup>).



Fuente: Propia.

#### 4.1.6. Densidad aparente y relativa e índice de porosidad

Para determinar la densidad aparente de las probetas se debió obtener primero el volumen aparente. Para esto, se utilizó la balanza hidrostática. El agua rellena los poros, saturando la probeta. Se consiguió el peso hidrostático, y teniendo ya la masa seca se dedujo el volumen que ocupan los poros – ya que éstos fueron rellenos con un líquido de densidad conocida – y mediante éste cálculo se determinó la porosidad. Se dividió el peso hidrostático entre el peso seco y se obtuvo así también la densidad aparente. Se tomó en cuenta la norma UNE-EN 1015-10.

La densidad aparente desciende a medida que incrementa el plástico reciclado (Fig. 81). Las probetas con plástico reciclado con contenido de carbono tienen mayor densidad aparente que las mezclas de misma dosificación con plástico de PVC. En cuanto a la densidad relativa, ocurre lo

mismo. Las mezclas con plástico con contenido de carbono también tienen mayor densidad relativa que sus respectivos en las mezclas con plástico de PVC, así como mayor peso y densidad.

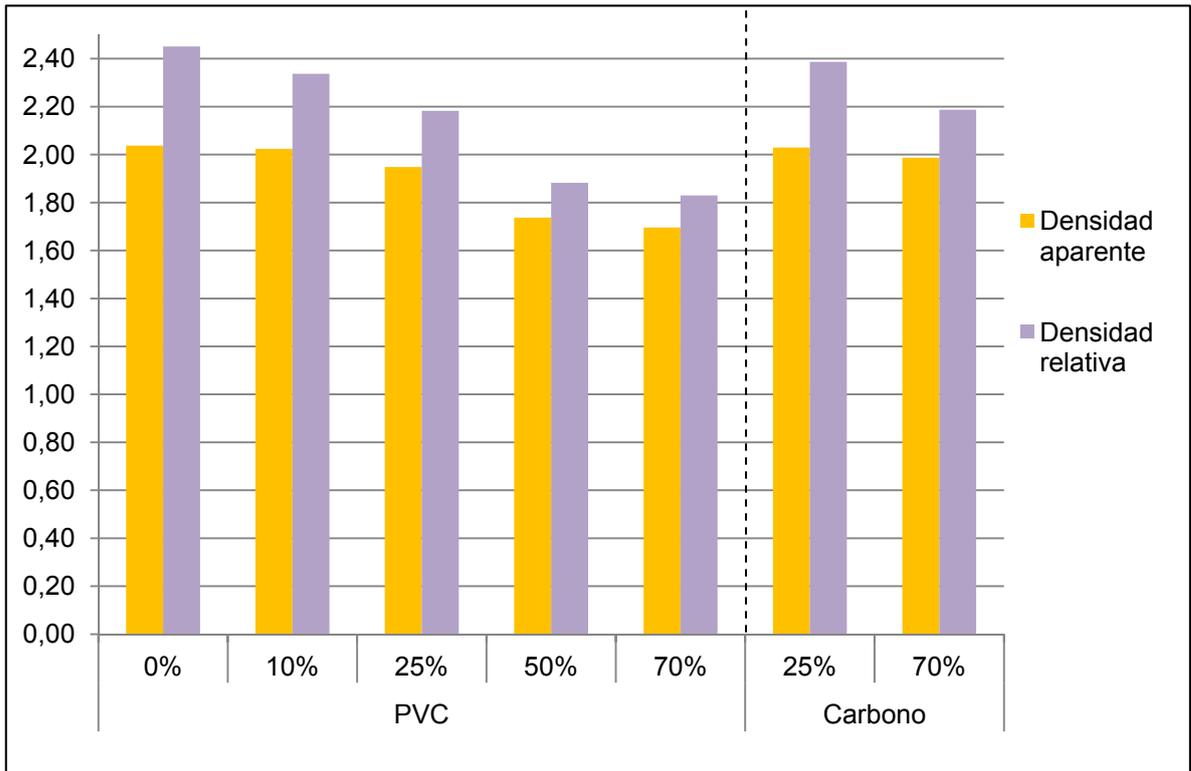
El índice de porosidad es la relación de vacíos, la relación volumétrica de huecos respecto a la parte sólida. Tal vez energéticamente no tenga relevancia, pero da una idea de las propiedades del material. A medida que va incrementándose el porcentaje de agregados de plástico reciclado de PVC, el índice de porosidad va disminuyendo constantemente (Fig. 82). Esto quiere decir que a mayor cantidad de plástico, la mezcla resulta ser menos porosa, pero más ligera. En el caso del plástico con contenido de carbono, igual decrece con el aumento de plástico, sin embargo estos índices son muy altos comparándolos con los de las mezclas del porcentaje respectivo de plástico reciclado de PVC.

Tabla 11. Resultados de ensayo de Densidad relativa, aparente e índice de porosidad.

Probetas		Peso hidrostático (g)	Peso saturado (g)	Peso seco (g)	Densidad aparente		Densidad relativa		Índice de Porosidad (%)		Ws (%)	
PVC	0%	1	124,10	273,43	253,46	2,04	<b>2,04</b>	2,43	<b>2,45</b>	16,10	<b>16,85</b>	7,88
		2	124,28	274,50	252,57	2,03		2,47		17,60		8,68
	10%	1	121,03	265,81	247,35	2,04	<b>2,02</b>	2,41	<b>2,34</b>	15,30	<b>13,35</b>	7,46
		2	121,48	257,34	243,45	2,00		2,26		11,40		5,71
	25%	1	116,40	242,84	230,14	1,98	<b>1,95</b>	2,22	<b>2,18</b>	10,90	<b>10,70</b>	5,52
		2	119,33	241,63	229,06	1,92		2,15		10,50		5,49
	50%	1	118,27	214,35	204,09	1,73	<b>1,74</b>	1,89	<b>1,88</b>	8,70	<b>7,70</b>	5,03
		2	125,99	228,86	220,36	1,75		1,88		6,70		3,86
	70%	1	117,21	206,73	197,45	1,68	<b>1,70</b>	1,83	<b>1,83</b>	7,90	<b>7,30</b>	4,70
		2	136,43	242,11	233,01	1,71		1,83		6,70		3,91
Carbono	25%	1	129,62	283,24	263,35	2,03	<b>2,03</b>	2,40	<b>2,39</b>	15,30	<b>14,95</b>	7,55
		2	140,88	306,15	285,58	2,03		2,37		14,60		7,20
	70%	1	128,01	264,04	252,08	1,97	<b>1,99</b>	2,17	<b>2,19</b>	9,30	<b>9,15</b>	4,74
		2	118,67	248,49	237,80	2,00		2,20		9,00		4,50

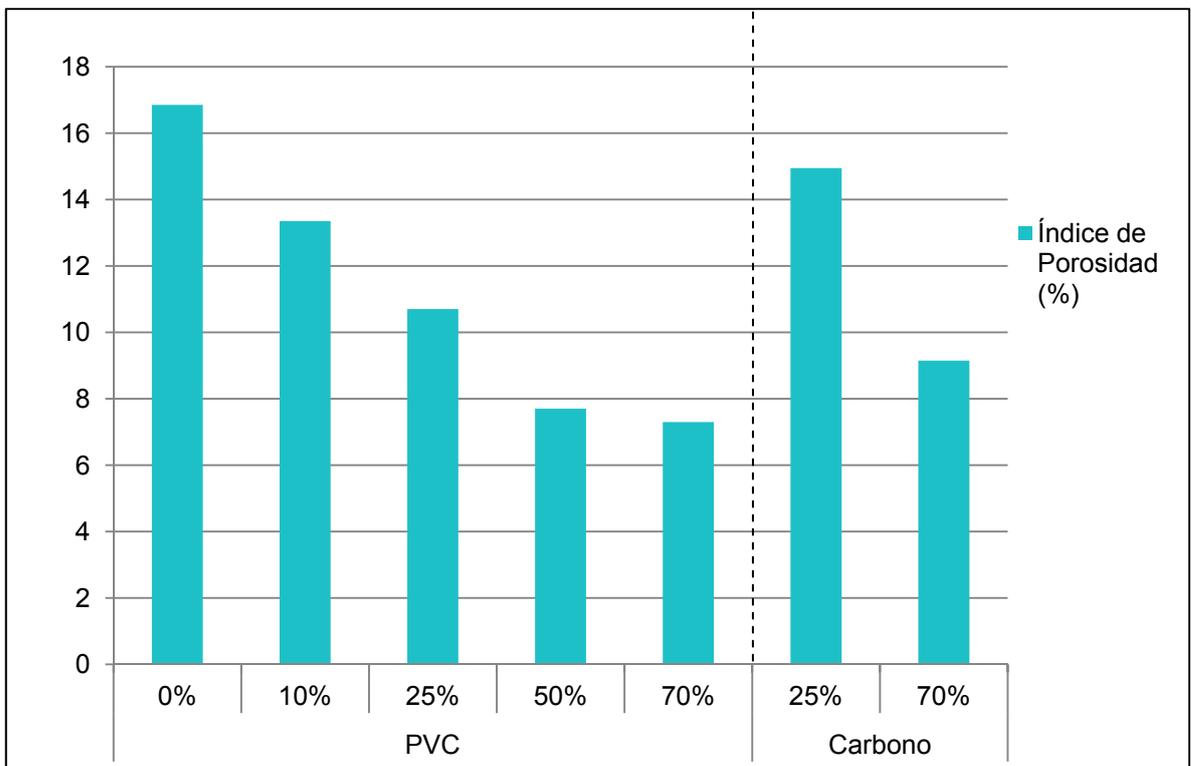
Fuente: Antonia Navarro Ezquerro, Laboratorio de Materiales de la EPSEB

Fig. 81. Gráfica mostrando la densidad aparente y relativa.



Fuente: Propia.

Fig. 82. Gráfica mostrando el índice de porosidad (%).



Fuente: Propia.

#### 4.2. Resumen de los resultados

Se comparan los resultados obtenidos en los ensayos, entre las mezclas creadas para encontrar cual es la dosificación más adecuada para su uso en la construcción

como bloques de mortero. Con estas comparaciones también se proponen otros usos para los morteros. El resumen comparativo mostrando los resultados de todos los ensayos se muestra a continuación en la Tabla 12.

Tabla 12. Cuadro comparativo resumen de los resultados obtenidos en los ensayos.

Ensayos de morteros			Con Plástico reciclado de PVC					De Carbono	
Nombre	Resultados a obtener	Unidad	0%	10%	25%	50%	70%	25%	70%
Reología	Densidad aparente	kg/m <sup>3</sup>	2337,37	2187,14	2001,29	1889,44	1782,58	2086,47	2134,12
Pesos	Peso	g	503,73	497,13	466,95	435,37	413,93	508,09	505,24
Conductividad térmica	Conductividad térmica	W/m·K	1,68	1,37	1,10	0,81	0,64	1,46	1,21
	Calor específico	J/m <sup>3</sup> ·K	1,77E+06	1,68E+06	1,60E+06	1,60E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,57E+06
	Difusividad térmica	m <sup>2</sup> /s	9,50E-07	8,21E-07	6,88E-07	5,08E-07	3,97E-07	8,97E-07	7,72E-07
Módulo de Elasticidad	Longitudinal (Impacto)	MPa	3625	3459	2956	2320	2089	3241	2783
	Longitudinal (Ultrasonido)	MPa	3127	3052	2906	2700	2483	3161	3075
	Flexión	MPa	19225	18387	13295	8143	6156	13843	10013
Flexotracción	Carga máxima	kg	206,00	187,80	152,00	87,30	69,50	175,30	165,20
	Tensión de rotura	N/mm <sup>2</sup>	1,26	1,15	0,93	0,53	0,43	1,07	1,01
Compresión	Carga máxima	kg	5380,30	4344,30	2981,70	1611,30	936,60	4330,80	3711,50
	Tensión de rotura	N/mm <sup>2</sup>	32,95	26,61	18,26	9,87	5,74	26,53	22,73
Porosidad y densidad	Densidad aparente	-	2,04	2,02	1,95	1,74	1,70	2,03	1,99
	Densidad relativa	-	2,45	2,34	2,18	1,88	1,83	2,39	2,19
	Índice de porosidad	%	16,85	13,35	10,70	7,70	7,30	14,95	9,15
Densidad	Densidad	kg/m <sup>3</sup>	2037,33	2023,87	1948,35	1737,33	1696,25	2029,41	1986,55
Bloques	En el armado	-	-	-	Consistencia pastosa. Fácil de crear.	Consistencia fluida. Menos fácil de crear.	Consistencia muy fluida. Difícil.	-	-
	Después de 24 hrs	-	-	-	Forma prismática	Forma prismática	Amorfo	-	-

Fuente: Propia.

### 4.3. Conclusiones del experimento

Observando la tabla y las gráficas anteriores, se puede apreciar lo que también está escrito en las investigaciones encontradas sobre el tema; con una menor densidad, proporcionada por el plástico a la mezcla de mortero, hay menores resistencias a compresión y flexo tracción. Esto se debe a que el plástico, además de ser más ligero, no posee cualidades resistentes y no podría soportar cargas. Por eso se crea una mezcla más pobre – en cuanto a propiedades mecánicas – que la convencional. El mortero creado con agregados de plástico no puede ser estructural ya que al aumentar el porcentaje de este, que es lo que se quiere para aligerar, pierde estas propiedades.

En el ensayo de porosidad se analizaron las densidades aparentes y relativas del mortero endurecido. Según la premisa en la que los hormigones aligerados son los que tienen  $2000\text{kg/m}^3$  o menos, se puede apreciar – de manera referencial, ya que son morteros y no hormigones – que se cumple a partir de las mezclas que contienen 25% de plástico reciclado de PVC. La mezcla con 10% de plástico está justo sobre el límite, lo cual indica que una mezcla con 15% de plástico sí podría estar en este grupo.

Si este material es para usos no estructurales, sí es un buen material, sobretudo porque posee cualidades térmicas, mejores que las del mortero convencional. Es un mejor aislante a medida que el porcentaje de plástico aumenta.

Otro aspecto térmico que posee este material, es que al tener una difusividad

térmica baja, el material demora en cambiar su temperatura para adaptarse a la temperatura del clima que lo rodea. Esto quiere decir que estos bloques de mortero con agregados de plástico podrían mantener una temperatura que se ha ganado durante el día, a lo largo de la noche fría, enfriándose poco a poco, mientras vuelve a amanecer y luego a subir la temperatura nuevamente. Entonces pueden hacerse muros no estructurales con este material en viviendas donde los climas poseen oscilaciones térmicas altas, ya que no se pierde ni gana calor o frío rápidamente.

En la Tabla 13 se pueden observar distintos materiales de construcción con algunas de sus propiedades térmicas. La siguiente tabla, (Tabla 14) muestra las mismas propiedades térmicas, para las mezclas de mortero con agregados de plástico reciclado. Se puede observar que la difusividad térmica de la mezcla que no posee plástico reciclado es muy similar a la que muestra el hormigón en la tabla de materiales de construcción; y la difusividad térmica de la mezcla con 70% de plástico reciclado, a la del hormigón ligero. La difusividad térmica de todas las mezclas con agregados de plástico reciclado son bajas, y mientras es inferior, mejor funciona. Si lo comparamos con las de los otros materiales podemos ver que este mortero funciona mejor y no pierde el calor tan rápidamente, como por ejemplo el fierro, que lo pierde sumamente rápido (Fig. 83).

Se muestra también en la Tabla 14 la efusividad térmica de las mezclas con agregados de plástico reciclado, y en la Tabla 15 a continuación, se muestra esta propiedad térmica para otros materiales de

construcción. La efusividad térmica mide la capacidad del material para almacenar el calor, y cuanto más alta sea la efusividad térmica de un material, más rápida será su capacidad de acumulación. Por el contrario, si es más baja la efusividad, será más lenta esta capacidad de acumulación. Se puede observar en la Tabla 15, que el hormigón

convencional posee una efusividad térmica mayor a la de todas las mezclas que poseen plástico reciclado en la Tabla 14. A medida que el plástico reciclado aumenta en las mezclas, la efusividad térmica decrece, siendo cada vez mejor en cuanto a acumular más lentamente el calor, lo que lo hace más aislante.

Tabla 13. Valores aproximados de difusividad térmica, conductividad térmica y calor específico volumétrico de algunos materiales de construcción.

Materiales	Difusividad térmica ( $\alpha$ ) (E-6) m <sup>2</sup> / s	Conductividad térmica ( $\lambda$ ) W / m · k	Calor específico volumétrico (E+6) ( $\rho \cdot c$ )
Ladrillo	0,440	0,600	1,350
Hormigón	1,000	1,700	1,800
Granito	1,600	3,500	2,200
Fierro	23,000	84,000	3,600
Hormigón ligero	0,280	0,140	0,500
Madera	0,190	0,140	0,750
Lana mineral	0,300	0,040	0,120

Fuente: *Introduction to building physics, Carl Eric Hagentoft, 2003*

Tabla 14. Valores de difusividad térmica, conductividad térmica, calor específico volumétrico y efusividad térmica para las mezclas de mortero con agregados de plástico reciclado.

Plástico reciclado	%	Difusividad térmica ( $\alpha$ ) (E-6) m <sup>2</sup> / s	Conductividad térmica ( $\lambda$ ) W / m · k	Calor específico volumétrico (E+6) ( $\rho \cdot c$ )	Efusividad térmica $b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$
De PVC	0%	0,950	1,680	1,770	1724
	10%	0,821	1,370	1,680	1517
	25%	0,688	1,100	1,640	1343
	50%	0,508	0,810	1,620	1144
	70%	0,397	0,643	1,600	1014
De carbono	25%	0,897	1,455	1,620	1535
	70%	0,772	1,205	1,570	1375

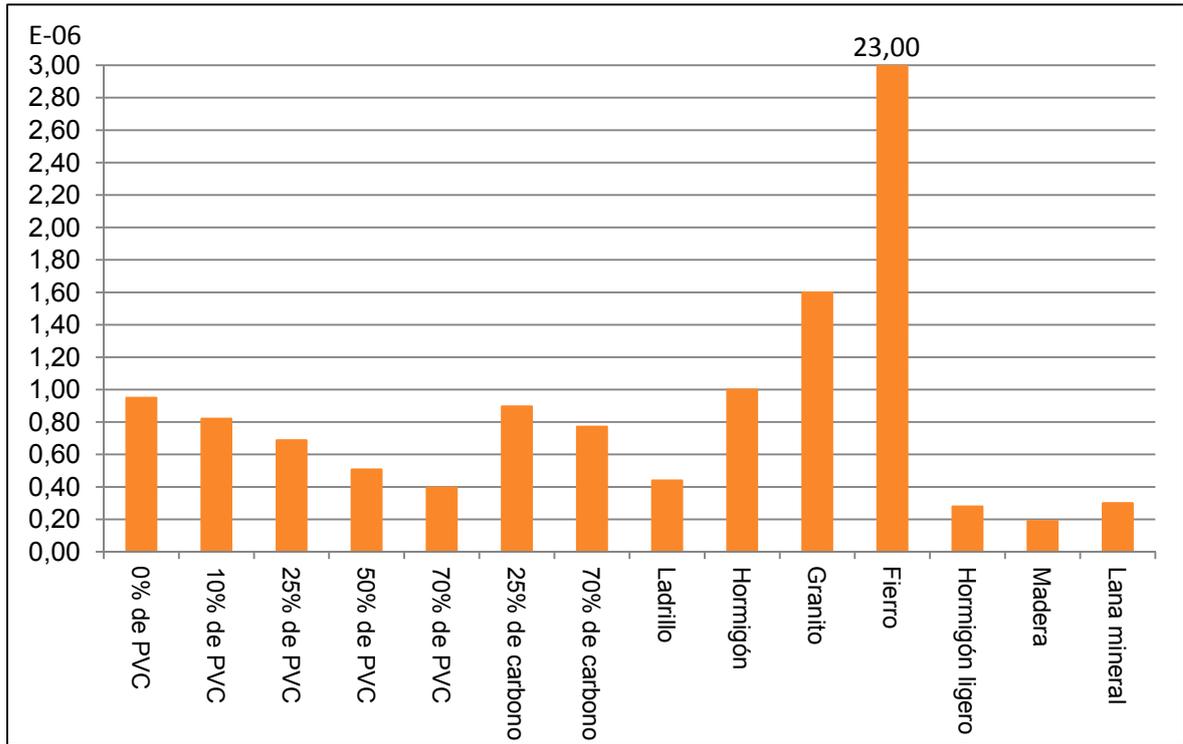
Fuente: Propia.

Tabla 15. Valores aproximados de efusividad térmica de algunos materiales de construcción.

Material	Cobre	Granito	Hormigón	Agua	Ladrillo	Madera	Hormigón ligero	Lana mineral
Efusividad térmica $b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$	37000	2800	1800	1600	900	310	230	140

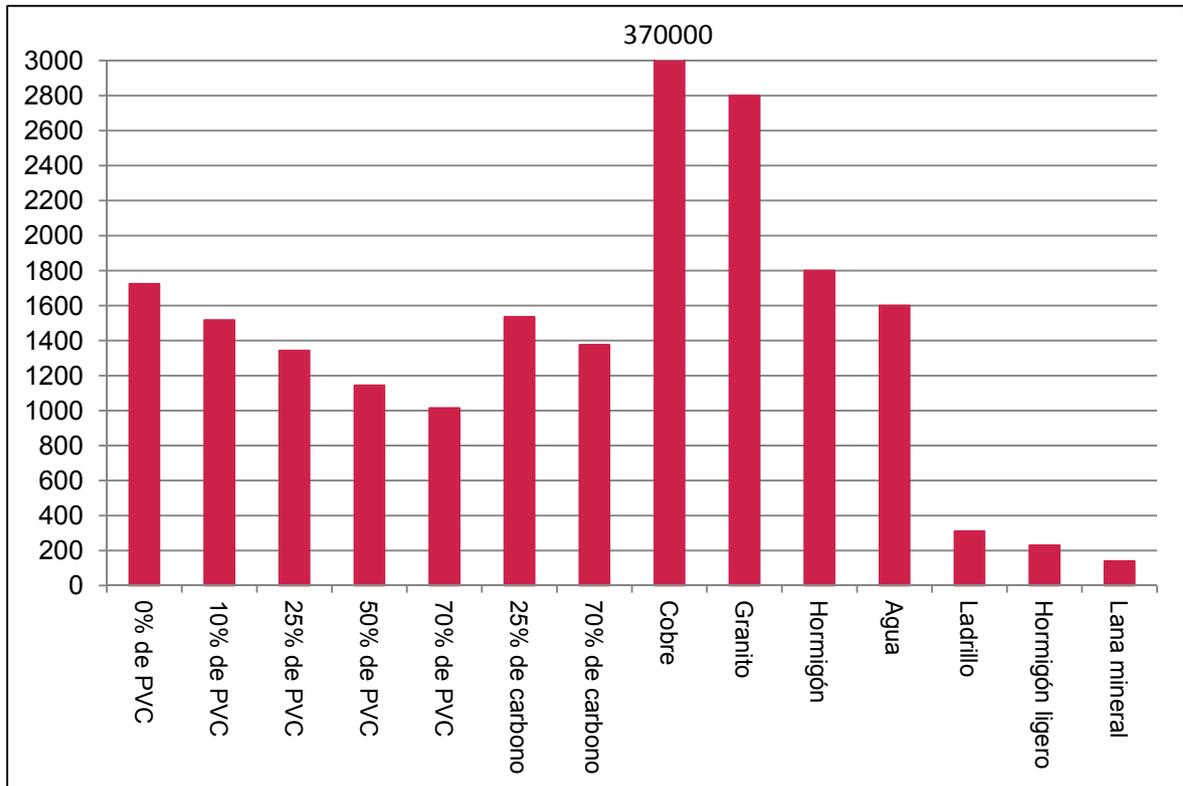
Fuente: *Introduction to building physics, Carl Eric Hagentoft, 2003*

Fig. 83. Gráfica comparando la difusividad térmica ( $m^2 / s$ ) de las mezclas de mortero con agregados de plástico y otros materiales de construcción.



Fuente: Propia.

Fig. 84. Gráfica comparando la efusividad térmica de las mezclas de mortero con agregados de plástico y otros materiales de construcción.



Fuente: Propia.

Como se pudo observar con la fabricación de bloques de mortero, la fabricación de estos depende mucho del porcentaje de plástico reciclado agregado a la mezcla, porque como se mencionó anteriormente, es posible obtener bloques de hasta 50% de agregados de plástico, pero ya de mayor cantidad, como en el caso del bloque con 70% de plástico, es difícil de fabricar y no mantiene su forma prismática, sino que se va perdiendo al ser una masa menos consistente, no se mantiene sólido (cuando está en pasta) como las mezclas con menor cantidad de plástico. Esto ocurre porque la adhesión entre la pasta de mortero y el plástico puede ser pobre, y se va soltando, deformando el bloque.

En cuanto a la comparación entre plásticos reciclados, el plástico reciclado de PVC es mucho más liviano que el plástico con contenido de carbono, sin embargo, este segundo tiene mayores resistencias a compresión, ya que también posee mayores densidades, y posee un mejor aislamiento térmico, comparándolo con los 25% y 70% que corresponden a la mezcla con agregados de plástico de PVC. Este mortero puede ser utilizado con fines térmicos como aislante, pero no como un mortero aligerado.

## PARTE 5: PROPUESTAS

### 5.1. Características de elementos constructivos hechos con mortero con agregados de plástico reciclado

Las propiedades estudiadas de las mezclas de mortero con agregados de plástico reciclado indicaron que este material puede funcionar mejor como aislamiento térmico que el mortero y hormigón convencional. Estas llevaron al análisis de los morteros a manera de elementos constructivos, como por ejemplo un muro de bloques de mortero, en donde se puede analizar la resistencia térmica ( $R$ ), la transmitancia térmica ( $U$ ) y la inercia térmica.

En cuanto a la resistencia térmica, se observa que esta incrementa a medida que se aumenta el porcentaje de plástico reciclado, y a la misma vez disminuye la transmitancia térmica (Tabla 16). Al aumentar la resistencia térmica significa que mejora como aislante. Es inversamente proporcional al coeficiente de conductividad térmica, por lo que cuando este coeficiente es menor,

significa que la resistencia será mayor, aunque depende también del espesor del elemento. La transmitancia térmica es el inverso de la resistencia térmica. Esta es la cantidad de energía que atraviesa una unidad de superficie de un elemento constructivo. A menor transmitancia, mejor funcionan los muros de un edificio manteniendo su interior aislado de la temperatura exterior (Fig. 85). Para el estudio de este muro de bloques de mortero, se planteó un espesor del bloque de 0,13m, y para evitar influencias de otros materiales, se estudio como si fuera un muro con acabado cara vista.

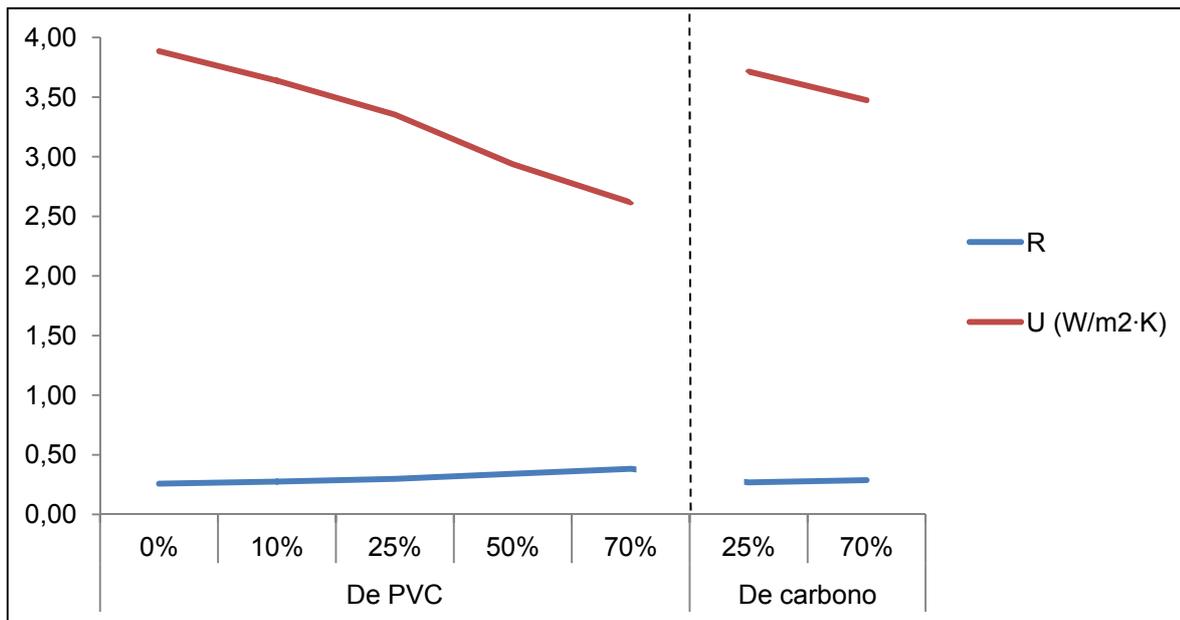
La inercia térmica representa la oposición de un cuerpo para cambiar su temperatura. Mientras mayor sea la inercia de este elemento, mayor cantidad de energía se necesitará para modificar su temperatura. La inercia térmica en un edificio regula las fluctuaciones interiores de temperatura, amortiguando las solicitaciones térmicas del exterior.

Tabla 16. Transmitancia térmica ( $U$ ) y Resistencia térmica ( $R$ ) de las mezclas de mortero.

Plástico reciclado	%	$e$	$\lambda$	$R = R_{si} + e/\lambda + R_{se}$	$U = 1/R$ ( $W/m^2 \cdot K$ )
		(m)	( $W/m \cdot K$ )		
De PVC	0%	0,13	1,68	0,26	3,89
	10%	0,13	1,37	0,27	3,64
	25%	0,13	1,10	0,30	3,35
	50%	0,13	0,81	0,34	2,94
	70%	0,13	0,64	0,38	2,62
De carbono	25%	0,13	1,46	0,27	3,71
	70%	0,13	1,21	0,29	3,47

Fuente: Propia.

Fig. 85. Gráfica mostrando la comparación de la transmitancia térmica (U) y resistencia térmica (R).



Fuente: Propia.

La inercia por transmisión corresponde a la oposición que generan los muros perimetrales a los cambios de temperatura, produciendo un desfase de la onda. La inercia por absorción corresponde a la regulación de temperatura que generan los muros interiores absorbiendo el calor de este espacio interior. Este tipo de inercia tiene relación con la efusividad térmica, que es la que regula la temperatura interior mediante la absorción de calor, a mayor efusividad, mayor absorción. La inercia térmica genera una reducción en la amplitud de la onda de temperatura interior con respecto a la onda exterior, un desfase temporal entre los picos interiores y exteriores.

La inercia térmica depende de la masa del elemento, del calor específico del material y del coeficiente de conductividad térmica. Esto quiere decir que al influir la masa, influye la densidad. En el caso de las mezclas de mortero, esta densidad va disminuyendo, lo que disminuye también la

inercia. Sin embargo, cuando un elemento no tiene buena inercia térmica, es buen aislante. Por ejemplo, un muro de piedra, siendo pesado y grueso, tiene inercia térmica, pero no funciona como aislante. Esto significa que siendo ligeros, estos muros de bloques de mortero tienen un buen aislamiento térmico, sobretodo porque el plástico funciona como aislante y los áridos influyen mucho en la mezcla del mortero.

Los bloques de mortero con hasta 50% de agregados de plástico reciclado son posibles de crearse, ya que la mezcla tiene docilidad y consistencia, aunque a medida que aumenta el plástico esta se va haciendo menos dócil y se va perdiendo la forma prismática del bloque. Es importante mencionar que los bloques con bajas cantidades de plástico reciclado son fabricados más fácilmente que con mezclas de mayor porcentaje de plástico, así que su fabricación es posible, logrando mantenerse sólidos y con forma prismática.

## 5.2. Propuestas de aplicación para el mortero resultante

Según los resultados obtenidos para cada mezcla de mortero, y los análisis hechos acerca de estos, se pueden encontrar distintas aplicaciones para estos, en el campo de la construcción. Es posible realizar bloques de mortero para los muros de cerramientos no estructurales, bloques macizos y huecos por dentro, para viviendas de uno o dos niveles. También se podrían producir tejas de mortero, ya que serían ligeras y añadirían menos carga al techo que las tejas convencionales. Se pueden fabricar soleras y pavimentos, y también se puede utilizar este mortero para revestimientos o revoques en las paredes, para dar un poco más de aislamiento térmico a los muros, y muy probablemente también mejores propiedades acústicas, aunque esto no se ha estudiado en esta investigación, se ha leído al respecto, y es una posibilidad.

### 5.2.1. Bloques de carga

En la construcción, los bloques de hormigón se rigen por la norma europea UNE EN 771-3:2011. Esta norma especifica las características y los requisitos de comportamiento de los bloques de hormigón fabricados tanto con áridos densos como aligerados. La resistencia normalizada a compresión mínima de las piezas utilizadas en muros resistentes que fija el CTE (Código Técnico de la Edificación) es de 5 N/mm<sup>2</sup>. La resistencia de los bloques depende de su densidad y composición, pudiendo alcanzar valores superiores a los 15 N/mm<sup>2</sup> de resistencia normalizada.

En la Tabla 17 se muestran las resistencias de las mezclas estudiadas, y se puede observar que las mezclas con 0%, 10% y 25% de plástico reciclado de PVC y las de 25% y 70% de plástico reciclado con contenido de carbono, tienen resistencias superiores a la normalizada. Las mezclas de 50% y 70% de plástico reciclado de PVC no superan esta resistencia de 15 N/mm<sup>2</sup>, pero sí llegan a superar la resistencia a compresión mínima, que es 5 N/mm<sup>2</sup>. Esto quiere decir que los bloques de mortero pueden resistir carga, y los de 50% y 70% de agregados de plástico, carga ligera. Mezclas mayores a 70% de plástico reciclado no podrían resistir cargas. Sin embargo, dada la consistencia de estas últimas dos mezclas, puede que no funcionen tan adecuadamente como las mezclas con menor cantidad de plástico, ya que su consistencia no es tan dócil y no se amolda tan bien.

Tabla 17. Resistencia de los morteros con agregados de plástico reciclado.

Probetas		Tensión rotura (N/mm <sup>2</sup> ) (Kgf/cm <sup>2</sup> )	
PVC	0%	<b>32,95</b>	335,80
	10%	<b>26,61</b>	271,14
	25%	<b>18,26</b>	186,10
	50%	<b>9,87</b>	100,57
	70%	<b>5,74</b>	58,46
Carbono	25%	<b>26,53</b>	270,30
	70%	<b>22,73</b>	231,65

Fuente: Propia.

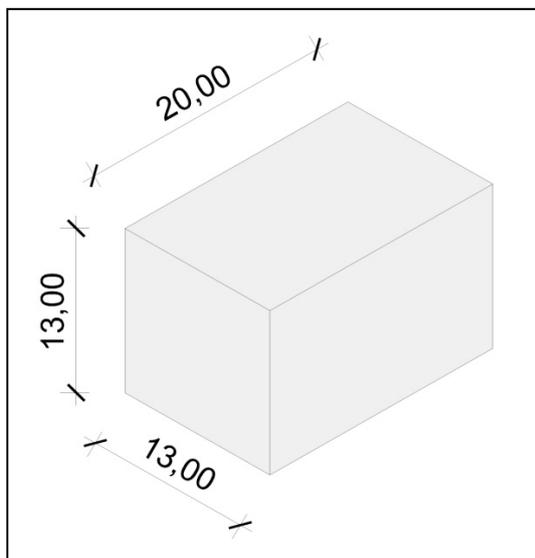
Se pueden fabricar entonces, bloques que soporten carga con los morteros que contienen 10% y 25% de agregados de plástico reciclado de PVC. Tienen una buena

consistencia, son sólidos y mantienen su forma. Además, como se vio en los ensayos de resistencia a compresión, al fallar resisten más tiempo que el mortero convencional, al ser un material dúctil. Los morteros con 10% de agregado de plástico, si bien resisten mejor a la compresión, tienen menores ventajas térmicas, a diferencia de las mezclas con mayor porcentaje de plástico, por lo que utilizarlo puede contribuir con la ligereza en algo pero no aportaría estas propiedades térmicas a la edificación.

Se pueden crear también bloques de mortero con 50% de agregados de plástico, aunque estos resistirían menor carga ligera. Estos bloques tienden a ser más blandos, pero aun se pueden fabricar y permanecer como prismas sólidos.

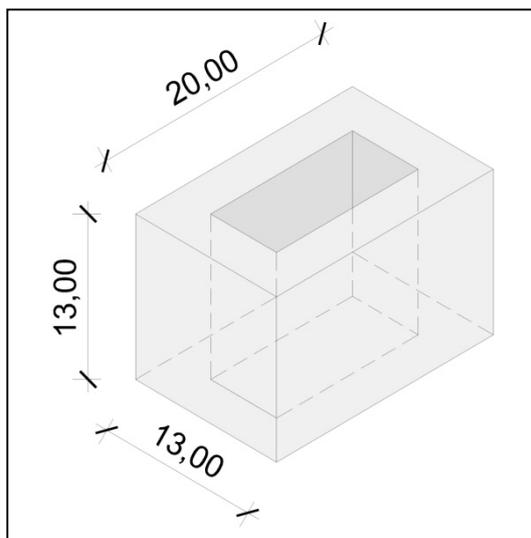
Los bloques de mortero con agregados de plástico reciclado fabricados poseen dimensiones de 20cm x 13cm x 13cm y un volumen de 3480 m<sup>3</sup> (Fig. 86). Según cada dosificación de plástico el peso del bloque varía, y si se plantea un muro de una misma dimensión con estos bloques, se puede encontrar su peso. De esta manera, se puede comparar la ligereza de cada muro con respecto al muro de bloques convencionales, sin agregados de plástico. Para esto se calculó el porcentaje que difiere entre el muro convencional y los demás muros, como se muestra en la Tabla 18. Se puede observar que un muro convencional de 2,00 x 2,50m de espesor de 13,00cm, hecho de bloques de mortero sin agregados de plástico reciclado pesa 1317kg, y un muro por ejemplo, con bloques de mortero con 25% de plástico reciclado tiene un peso de 1260kg, teniendo un aproximado de 5% menos del peso del muro convencional.

Fig. 86. Esquema de un bloque macizo de mortero con agregados de plástico reciclado.



Fuente: Propia.

Fig. 87 Esquema de un bloque hueco de mortero con agregados de plástico reciclado.



Fuente: Propia.

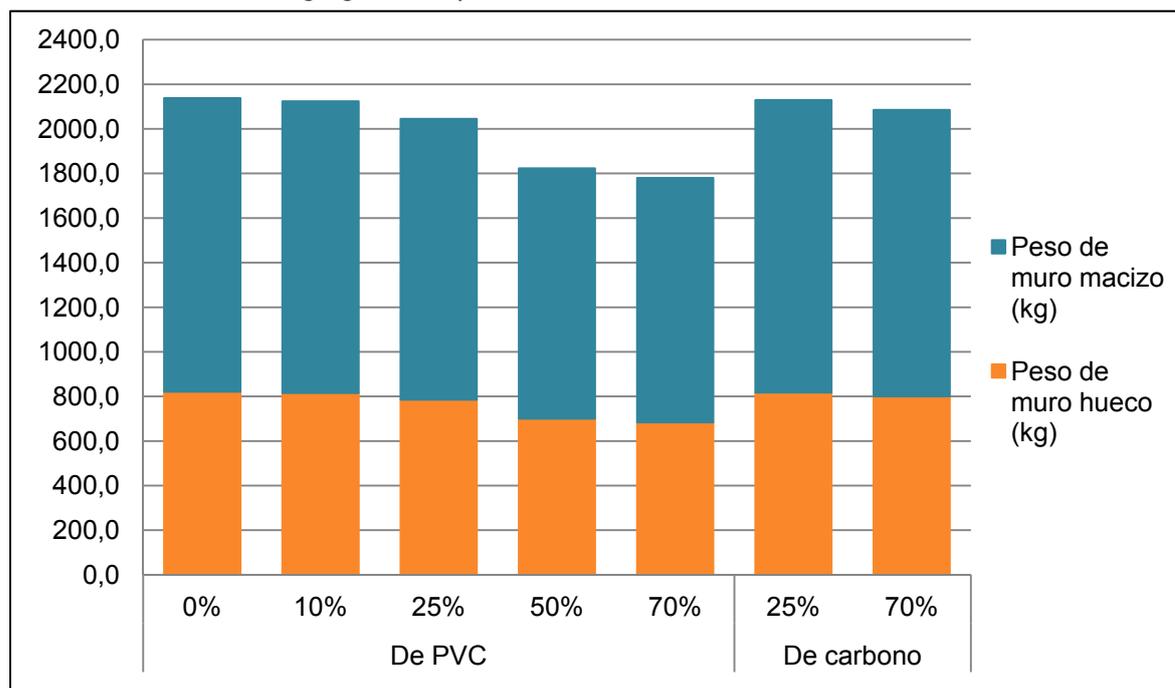
Los bloques huecos hechos con este mortero (Fig. 87) podrían fabricarse siempre y cuando las paredes de los bloques tengan un espesor algo grueso, de aproximadamente 3cm, dejando un hueco de 7cm o similar, de tal manera que estas no son tan delgadas y pueden mantenerse

Tabla 18. Cálculo de un muro de bloques de mortero con cada dosificación de agregados de plástico reciclado

Morteros		Bloques 0,13 x 0,13 x 0,20			Muros 0,13 x 2,00 x 2,50		Diferencia con respecto al muro de 0% macizo	
Plástico reciclado	%	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Peso macizo (kg)	Peso hueco (kg)	Peso macizo (kg)	Peso hueco (kg)	Muro macizos %	Muro huecos %
De PVC	0%	2037,33	6,89	4,29	1317,3	820,8	-	-
	10%	2023,87	6,84	4,26	1308,6	815,4	<b>0,7%</b>	<b>38,1%</b>
	25%	1948,35	6,59	4,10	1259,8	784,9	<b>4,4%</b>	<b>40,7%</b>
	50%	1737,33	5,87	3,66	1123,3	699,9	<b>14,7%</b>	<b>49,0%</b>
	70%	1696,25	5,73	3,57	1096,8	683,4	<b>16,7%</b>	-
De carbono	25%	2029,41	6,86	4,27	1312,2	817,6	<b>0,4%</b>	<b>45,6%</b>
	70%	1986,55	6,71	4,18	1284,5	800,3	<b>2,5%</b>	<b>39,4%</b>

Fuente: Propia.

Fig. 88. Gráfica mostrando el decrecimiento del peso (kg) de los muros de bloques macizos y huecos de mortero con agregados de plástico reciclado.



Fuente: Propia.

sólidas. Esto se puede decir según lo observado cuando se fabricaban los bloques macizos y se trabajaba con el mortero, el cual tenía una consistencia pastosa y permanecía unida y sin esparcirse, cuando se intentaba pegar a las paredes del

recipiente de manera vertical. Este tipo de bloques serían más ligeros, podrían utilizarse para los segundos niveles de una vivienda por ejemplo. Además podrían servir incluso mejor que el bloque macizo como aislamiento térmico al poseer un espacio de aire dentro

de las paredes, no permitiendo el paso del calor o del frío del exterior hacia adentro de la vivienda. Un bloque hueco hecho, por ejemplo, con el mortero de 25% de agregados de plástico reciclado pesaría 4,10kg. Simulando un muro como el mencionado anteriormente, hecho con bloques huecos, tendría un peso de 789,90kg. Esto significa una reducción del 38% del peso comparado con los bloques macizos de mortero de 25% de plástico reciclado, y una reducción del 41% comparado con los bloques convencionales. El cálculo no se realizó para morteros con 70% de agregado de plástico ya que estos no podrían fabricarse por su propia consistencia, y las paredes de este bloque, al ser algo delgadas, no resistirían.

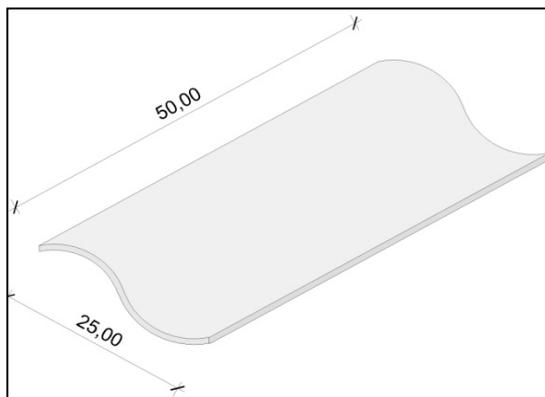
### 5.2.2. Tejas hechas de mortero

Las tejas sirven para la autoconstrucción de viviendas. Esto significa que son fáciles de colocar y sirven para viviendas sencillas, pero también pueden fabricarse de manera serial y utilizarse en construcciones más grandes. Se podrían fabricar tejas hechas con estas mezclas de mortero con agregados de plástico reciclado de hasta el 25%, para aligerar en algo las cargas del techo. Se podrían hacer de manera prensada, para evitar la existencia de porosidad, como se observó en el ensayo, que mostró que existe una porosidad media en estos morteros. También se tendrían que realizar pruebas de estanqueidad para saber si pueden ser impermeables, y de no ser así añadir algún material plástico para lograrlo. De funcionar, estos elementos podrían servir tal vez mejor que las tejas de mortero

convencional, ya que tienen una menor densidad y son mejores aislantes térmicas. Se podrían fabricar con moldes de plástico para darles forma, con dimensiones nominales de 50cm x 25cm y efectivas de 40cm x 20cm, un traslape longitudinal de 10cm y un traslape transversal de 5cm. El espesor de esta teja tendría 8mm (Fig. 89). Por metro cuadrado caben 12,5 tejas. {{11 P. Lorenzo Gállico, 2005}}. Si se utilizara el mortero con porcentaje de agregados de plástico reciclado de PVC de 25%, una teja de estas dimensiones pesaría 1,95kg, siendo el peso de la teja convencional de 2,04kg. Entonces el peso de un metro cuadrado de tejas con el 25% de plástico reciclado sería de 24,4kg, mientras que el de las tejas convencionales sería de 25,5 kg. Esto representa una reducción con respecto al peso de tejas convencionales del 4,3%, lo cual reduce cargas en las losas de techo.

Las tejas fabricadas con mortero de 50% de agregados de plástico tal vez podrían funcionar, ya que son más livianas y poseen mejores propiedades térmicas, pero habría que realizar los ensayos pertinentes para saber si pueden ser impermeables.

*Fig. 89. Esquema de una teja de mortero con agregados de plástico reciclado.*



*Fuente: Propia.*

### 5.2.3. Soleras, pavimentos y revoques

Otro uso que se le puede dar a estos morteros es para la fabricación de soleras y pavimentos. En estos casos, el. Las soleras son hechas de una capa de mortero horizontal, con un espesor de 5 a 25 cm, mortero no tiene ninguna misión estructural dependiendo del uso que tenga y del tipo de tránsito. Esta capa se apoya sobre un terreno compactado, teniendo entre ambos, una capa de arena y grava, de tamaño grande, de diámetro similar y limpia. Esta sirve para impedir el paso de la humedad que pueda tener el terreno al mortero, para que este no lo absorba. El mortero puede tener una gran capacidad de reparto de cargas, derivada de su rigidez, y de ser así no debería tener problemas al apoyarse sobre el terreno directamente, pero es conveniente que exista esta capa de grava. La superficie de apoyo debe estar contenida en un plano paralelo a la superficie final del mortero terminado, para así obtener un espesor uniforme. Esta capa de mortero puede ser el acabado definitivo o como base para recibir otro tipo de pavimentos (Fig. 90).

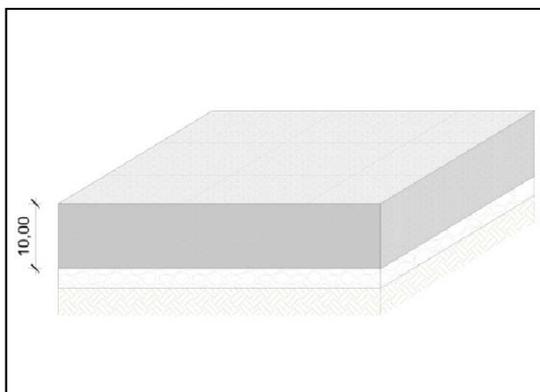
Para este fin, se podría utilizar el mortero estudiado, con agregados de plástico reciclado. Para estos casos, al no necesitar soportar casi carga, podría utilizarse la mezcla de mortero hasta con dosificaciones de 50% de plástico reciclado. Utilizar el mortero de 70% de agregados de plástico reciclado podría ser complicado, ya que al poseer tantos gránulos de plástico la mezcla, quedan muy en la superficie, consiguiendo que con el rose que tendría este pavimento, los gránulos en la superficie comiencen a soltarse, dejando muy pequeños agujeros, y

ensuciando. Además posee ya muy poca resistencia y puede que no cumpla la función.

Este pavimento, además de otorgar ligereza al suelo, también sirve aislando térmicamente, si se trata de un interior, de tal manera que puede dar un valor agregado a la vivienda o espacio interior en una edificación. Ya sea un espacio interior o exterior, de igual forma se está utilizando un material reciclado, reemplazando áridos naturales, lo cual ya es una ventaja para el medio ambiente.

Otro tipo de pavimento que podría fabricarse con estos morteros, es el de tipo adoquines. Un ejemplo de este tipo de suelos se desarrolló en Argentina {{11 P. Lorenzo Gállico, 2005}}. Para este pavimento se reciclaron moldes de envases de huevos (Fig. 91), y botellas plásticas de bebidas, (Fig. 92) y redes para envases de hortalizas en el interior. En este caso no solo se estaría utilizando el plástico reciclado contenido en el mortero, sino además se reutilizarían residuos de plástico que de otra manera serían desechados y enviados a los vertederos.

Fig. 90. Esquema de solera hecha con mortero con agregados de plástico reciclado.



Fuente: Propia.

Estos envases plásticos servirían como encofrado, y se vertería el mortero dentro, que sería luego desencofrado para quedar como piezas unitarias, (Fig. 93 y Fig. 94), las cuales se colocarían semi enterradas en una cama de arena, la cual también rellenaría el espacio vacío entre cada pieza. Finalmente se completaría el pavimento con bordes contenedores de mortero. {{11 P. Lorenzo Gállico, 2005}}. Este tipo de pavimento se encuentra a nivel prototipo, pero es una buena opción para utilizarlo en jardines o espacios exteriores. De ser así, se podría utilizar en reemplazo del hormigón o mortero convencional, el mortero estudiado, con agregados de plástico reciclado del 50%, por las mismas razones previamente explicadas. Se podría intentar construir con el mortero de 70% de plástico reciclado, pero si el tránsito de este suelo es de nivel alto, podría desgastarse muy rápidamente. Este tipo de pavimento es una buena opción, y además de ser ingeniosa y decorativa, contribuye a un mayor y mejor reciclaje y reutilización del plástico.

*Fig. 91. Fotografía de fabricación de pavimento exterior hecho con hormigón y moldes de envases plásticos de huevos.*



*Fuente: Un Techo para vivir, P. Lorenzo Gállico, 2005*

*Fig. 92. Fotografía de resultado de pavimento exterior hecho con hormigón y moldes de envases plásticos de huevos.*



*Fuente: Un Techo para vivir, P. Lorenzo Gállico, 2005*

*Fig. 93. Fotografía de envases de botellas plásticas de bebidas rellenas con hormigón.*

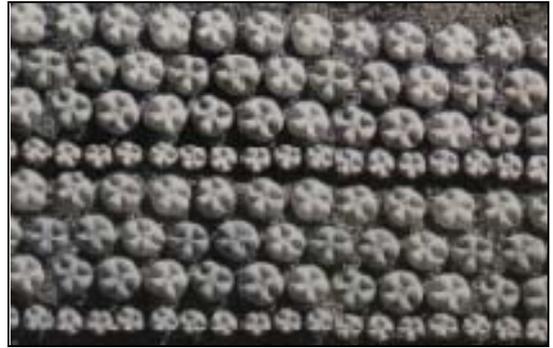


*Fuente: Un Techo para vivir, P. Lorenzo Gállico, 2005*

En cuanto a la utilización de estos morteros para revestimientos o revoques en las paredes, la mezcla de mortero con el 50%

de agregados de plástico reciclado es una buena opción, ya que aun arma bien en el sentido vertical y es un material ligero, además que contribuiría con el aislamiento térmico de las paredes y le daría un valor agregado a este recubrimiento o tarrajeo. Se podría utilizar también el mortero con el 70% de agregados de plástico reciclado, pero tal vez no en toda la pared, si no en espacios que no tengan tanta altura para que pueda armar en el sentido vertical. En este caso el aislamiento térmico sería mayor y más ligero. Se podría además utilizar como elemento decorativo, ya que posee una textura granulada, diferente a la común de los tarrajesos que son lisos; el cual puede ser utilizado de forma más original y creativa.

*Fig. 94. Fotografía de resultado de pavimento exterior hecho con envases de botellas plásticas de bebidas.*



*Fuente: Un Techo para vivir, P. Lorenzo Gállico, 2005*



## PARTE 6: CONCLUSIONES FINALES

---

### 1

El introducir agregados de plástico reciclado a mezclas de mortero resulta ventajoso en cuanto a sus aportes térmicos, no contribuye con las resistencias, por el contrario, estas decrecen, pero si se trata de elementos de construcción que soporten carga ligera, con estos morteros se pueden conseguir buenos resultados, que además aportan un valor agregado, que es el aislamiento y la ligereza del material. Este aporte es muy importante ya que en el futuro se pueden reducir costos, se ahorraría en calefacción o refrigeración, o ya no se invertiría en revestimiento aislante para los muros de cerramiento de la vivienda.

Al acabar el ciclo de vida del hormigón convencional, ya sea por antigüedad o demolición, es llevado a las recicladoras para utilizarse como áridos en nuevo hormigón convencional. Sería el mismo caso para estos morteros con agregados de plástico reciclado, ya que pueden ser introducidos en un nuevo material, además que el plástico se encuentra encapsulado dentro del mortero y no escaparía del interior.

Resulta ventajoso el usar el plástico reciclado, porque de esta forma se incentiva a las recicladoras a obtener más de este material para introducirlo en el mercado de la construcción, y el desperdicio que iría a parar al medio ambiente o que es incinerado sería cada vez menor.

Un hecho de los termoplásticos, como el PVC, es que pueden ser reciclados varias

veces antes de perder todas sus propiedades. Entonces, la idea no sería solamente introducir este plástico reciclado a los morteros, ya que este puede seguir siendo usado en algunos productos, como nuevos envases. La idea, principalmente, sería utilizar el plástico reciclado que se encuentra en sus últimos ciclos de vida, es decir, cuando ya llegó a un límite de cantidades de reciclaje y ya no puede fabricarse ningún producto con este. De esta manera, se utilizaría algo que ya va a ser desechado, y así habría menor cantidad de desperdicio. El uso de este plástico de propiedades pobres no afectaría en los morteros, ya que está en la mezcla como un material pasivo y no aporta nada en cuanto a resistencias – pensando que además estos materiales se plantean como materiales no estructurales –. En cuanto a sus propiedades térmicas, se seguirían manteniendo, ya que de igual manera funcionaría bien como aislante térmico, y si este plástico se degradara por completo dentro de un muro de bloques de mortero, quedarían los espacios de aire, resultando igualmente un aislante térmico.

### 2

Como se ha podido observar a lo largo de la investigación de la teoría y los resultados encontrados en la campaña experimental, estos morteros con agregados de plástico reciclado muestran una mejora en sus propiedades térmicas, comparado con el

mortero convencional. La conductividad térmica decrece, lo que genera en el material una lenta capacidad de calentamiento y de acumulación. Resulta menor que la conductividad térmica del ladrillo. Esto quiere decir que al tener menor conductividad se vuelve un mejor aislante. La difusividad térmica también decrece, lo que le da una capacidad más lenta de calentamiento, es menos propenso a cambios de temperatura del exterior. La efusividad térmica decrece, consiguiendo una capacidad de acumulación de calor también más lenta. Todas estas propiedades van en una misma dirección, el hacer al material más aislante con el aumento del agregado de plástico. Al analizar la resistencia en un elemento constructivo hecho con estos morteros, esta incrementa, lo que es una mejora, y observando la transmitancia térmica, (la inversa de la resistencia), esta decrece con el aumento del plástico, se transmite menos este calor (o frío) hacia el interior. Todas estas propiedades convierten a este mortero con agregados de plástico en un mejor aislante térmico que el mortero convencional.

### 3

Como se observó en el capítulo de Propuestas, estos morteros pueden tener muchos usos en el ámbito de la construcción, bloques para muros no estructurales que resistan carga o que sean puramente divisorios y muy livianos, tejas de mortero (aunque habría que estudiarlo de manera más profunda), soleras y pavimentos de muchos tipos, para interiores y exteriores, revestimientos y revoques de paredes que

aportan aislamiento. Con distintas dosificaciones de plástico se pueden conseguir distintas propiedades, dependiendo de lo que se requiera.

En cuanto a los bloques de mortero, estos bien podrían producirse tanto en cooperativas rurales, (es decir de manera artesanal), como en fábricas, de manera industrial. Así estos bloques podrían llegar a varios sectores poblacionales y constructivos.

Finalmente, se analizó el mortero con agregados de plástico reciclado que puede tener más usos o servir mejor. Se estudiaron todas sus propiedades en conjunto, es decir, manteniendo un equilibrio de lo que se gana y se pierde – como la resistencia disminuida a compresión, comparada con la ganancia de ligereza y aislamiento térmico – y se vio que el mortero que puede servir más es el que tiene la mezcla con el 25% de agregados de plástico reciclado de PVC. Este mortero tiene una buena consistencia, resiste a las cargas a compresión como para utilizarse en bloques para una vivienda, es un material ligero y fácil de construir y sobretodo aporta un adecuado aislamiento térmico. Este mortero está seguido por el de dosificación de 50% de plástico reciclado, que tiene un mejor aislamiento térmico, aunque menor resistencia a compresión, (pero podría utilizarse para bloques en muros divisorios). Probablemente un mortero de dosificación de 30% - 40% de agregados de plástico funcione mejor, en cuanto a mantener un equilibrio entre la resistencia a compresión y el aislamiento térmico.

La mezcla conteniendo el 10% de agregados de plástico de PVC funciona mejor en cuanto a resistencias, pero posee

muy poca cantidad de plástico como para poder adquirir las cualidades térmicas buscadas; y la mezcla con 70% de agregados de plástico tiene pocos usos, ya que casi no posee resistencias y se puede desgastar rápido al ser tan granulado. Sin embargo, dependiendo de las características buscadas, todas las mezclas pueden servir para algo, dando el valor agregado del aislamiento térmico y la ligereza.

#### 4

Para terminar con este capítulo, y con el estudio desarrollado a lo largo de esta investigación, se concluye con la idea del reemplazo de los áridos naturales para utilizar en los morteros y hormigones: No solo se está reciclando y reutilizando un material que de otra manera quedaría como residuos en el medio ambiente, si no que se extraería menor cantidad de material pétreo de canteras, evitando la degradación del paisaje. Así, el impacto ambiental de estos morteros decrece, sumando además que al utilizar plástico como agregados o áridos, se requiere menor cantidad de agua. Esto, sumado al hecho de que se está reciclando, decrecería el impacto ambiental de este material de construcción tan usado hoy en día, y que continúa yendo en ascenso.



## PARTE 7: BIBLIOGRAFÍA

---

### 6. Bibliografía

#### 6.1. Bibliografía general

[1] H. Weigler, S. Karl, Hormigones ligeros armados, Editorial Gustavo Gili S.A.

[2] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón, 1.4. Reglas generales, hormigón de árido ligero de textura cerrada, 1997

[3] M. Fernández Canovas, Hormigón, Servicio de publicaciones R.O.P., E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1991

[4] A. Mueller, S.N. Sokolova, V.I. Vereshagin, Characteristics of lightweight aggregates from primary and recycled raw materials, Construction and Building Materials, 22, 4, (April 2008) 703–712

[5] Waste Watch information sheet, Plastics, www.wastewatch.org.uk, UK, 2008

[6] Plastics Europe, The Compelling Facts About Plastics – An analysis of plastics production, demand and recovery for 2006 in Europe, Enero 2008

[7] J. M. Arandes, J. Bilbao, D. López Valerio, Reciclado de residuos plásticos, Revista Iberoamericana de Polímeros, Volumen 5 (1), Marzo 2004

[8] Aïtcin, Pierre-Claude, Universidad de Sherbrooke, Québec Canadá. El futuro del hormigón y el hormigón del futuro, 2008.

[9] C. García Andreu, J.M. Saval Pérez, F. Baeza Brotons, A.J.Tenza Abril, Universidad de Alicante, Prácticas de Materiales de Construcción, I.T. obras Públicas, 2009

[10] Carl Eric Hagentoft, Introduction to building physics, 2003

[11] J. R. Rosell, I. R. Cantalpie, Método simple para determinar el modulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento, Materiales de Construcción, Vol. 61, 301, 39-48, Marzo 2011

#### 6.2. Bibliografía específica sobre el tema

##### 6.2.1. Libros

[12] M. Reyes Vigil Montaña, A. Pastoriza Martínez, I. Fernández de Piérola, Los plásticos como materiales de construcción, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid 2002

[13] Asociación Nacional de Recicladores de Plástico, El Reciclado de plásticos en España, Valencia, 1996

[14] P. Lorenzo Gálligo, Un techo para vivir, Centre de Coperació per al Desenvolupament – CCD, UPC, 2005.

##### 6.2.2. Artículos de revistas

[15] R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur, Use of recycled plastic in concrete: A review, Waste

Management, Vol. 28, Issue 10 (2008) 1835–1852

[16] A.A. Al-Manaseer, T.R. Dalal, Concrete containing plastic aggregates, *Concrete International*, Vol. 19, Issue 8 (Agosto 1997) 47-52.

[17] Yun-Wang Choi, Dae-Joong Moon, Jee-Seung Chung, Sun-Kyu Cho, Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete, *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 776–781.

[18] R. Gaggino, R. Arguello, H. Berretta, Aplicación de material plástico reciclado en elementos constructivos a base de cemento, IV Encuentro Nacional y II Latinoamericano: Edificaciones y Comunidades sustentables, (2007), Campo Grande, Brasil.

[19] A. Sánchez López, E. Ramírez Ramírez, C. Román Ugarte, P. Miguel Álvarez De Cienfuegos Gálvez, J.D. García Espinel, A. Neyeloff Frugone, J. Gómez Hoyos, L. R. Clemente Ortega, Sánchez, R. Cortinat Sánchez, Desarrollo y experimentación del sistema M.L.G. (Metro ligero de Granada): Primer sistema nacional de vía en placa embebida en hormigón realizado con una mezcla de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y resina de matriz polimérica, *Revista de Obras Publicas*, v 156, n 3505, p 7-20, Diciembre 2009

[20] R. Laos, J. Chávez, C. Rospiglios, B. Bertolotti, J. Nakamatsu, Concreto polimérico a partir de botellas descartables, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2006

[21] Pilot and Market Replication Projects, Eco – Innovation, Lightweight aggregate for concrete from recycling of plastic waste.

[22] C.E. Pierce, M. C. Blackwell, Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill, *Universidad de Carolina Del Sur*, 2003

[23] Phaiboon Panyakapo, Mallika Panyakapo, Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete, *Waste Management* 28 (2008) 1581–1588

[24] K.S. Rebeiz, A.P. Craft, Plastic waste management in construction: Technological and institutional issues, *Resources, Conservation and Recycling* 15 (1995) 245-257

[25] Nabajyoti Saikia, Jorge de Brito, Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review, *Construction and Building Materials* 34 (2012) 385–401

[26] Zainab Z. Ismail, Enas A. AL-Hashmi, Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement, *Waste Management* 28 (2008) 2041–2047

[27] B.W. Jo, S.K. Park, C.H. Kim, Mechanical properties of polyester polymer concrete using recycled polyethylene terephthalate. *ACI, Structural Journal* 103, (2006) 219–225.

[28] O.Y. Marzouk, R.M. Dheilly, M. Queneudec, Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites, *Waste Management* 27(2007), 310–318.

[29] T.R. Naik, S.S. Singh, C.O. Huber, B.S. Brodersen, Uso di scarti plastici post-utilizzati nel cemento a base di materiali composite, *Cement and Concrete Composites* 26, (1996), 1489–1492

[30] L. Pezzi, P. De Lice, D. Vuono, F. Chiappetta, A. Nastro, Concrete products with waste's material bottle, glass, plate, Materials, Science Forum, (2006) 1753–1757.

[31] Cement Concrete & Aggregates Australia, Use of Recycled Aggregates in Construction, (2008)

### **6.2.3. Proyectos finales de carrera, tesinas y tesis Doctorales**

[32] C. Reyes Nájera, J. Avellaneda, Estudio del comportamiento de morteros reforzados con fibras de maíz, para componentes de viviendas de bajo coste, Tesis doctoral - Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, 2009

[33] L. H. Maccarini Vefago, J. Avellaneda, El concepto de reciclabilidad aplicado a los materiales de construcción y a los edificios: propuesta de índices para evaluar la reciclabilidad de los sistemas constructivos, Tesis doctoral - Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, 2011

[34] S. Riera Juan, M. A. Gonçalves Soares, J.R. Rosell, A. Navarro, J. Ramírez, Análisis comparativo experimental de algunos morteros de restauración, Proyecto final de carrera – Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela politécnica Superior de Edificaciones de Barcelona, Departamento de Arquitectura Técnica, Marzo 2010



## PARTE 8: ANEXOS

---

### 8.1. El hormigón: Historia a través del tiempo

El hormigón es fundamental en la historia de la construcción. En el tiempo en que se decidió levantar edificaciones, utilizando primero materiales arcillosos y pétreos, se creó la necesidad de utilizar morteros que permitieran unir estos materiales para crear muros y estructuras estables. En un primer momento se utilizaron morteros de yeso, arcilla o cal, pero estos se deterioraban muy rápidamente con el clima y el medio ambiente. Entonces se pensó en soluciones para que no se degraden estos morteros, añadiendo rocas y minerales triturados.

En el Antiguo Egipto, se fabricaron pastas obtenidas con mezclas de yesos y calizas disueltas en agua, para poder unir los sillares de piedra y que quede un muro sólido; como las que aún se encuentran entre los bloques calizos del revestimiento de la Gran Pirámide de Guiza. Asimismo, hacia el 500 a.C., en la Antigua Grecia se mezclaban compuestos de caliza calcinada con agua y arena, añadiendo piedras trituradas, creándose el primer hormigón en la historia.

El hormigón ligero se creó debido a la necesidad de materiales de poco peso. Los inicios del empleo de este se pueden observar desde las construcciones antiguas en las culturas precolombinas asentadas en México, donde se utilizó la piedra pómez y las cenizas volcánicas como aglomerantes mezcladas con cal. Posteriormente, los romanos emplearon

hormigón aligerado para realizar la cúpula del Panteón en Roma, construido en el siglo II a.C. Esta tiene 44 metros de diámetro y fue hecha con un hormigón in situ, utilizando como árido la piedra pómez.

El cemento portland fue obtenido de caliza arcillosa y carbón calcinados a altas temperaturas, y se patentó en 1824. Comenzó a utilizarse en las pastas reemplazando a los materiales conglomerantes como lo eran el yeso, la arcilla y la cal. Posteriormente, en 1845, Isaac Johnson obtuvo el prototipo del cemento moderno creado de una mezcla de caliza y arcilla calcinada a altas temperaturas, hasta la formación del clinker.

El hormigón armado se patentó en 1854, pero el hormigón ligero armado no se utilizó para construcciones portantes hasta tiempos recientes, cuando se consiguió fabricar artificialmente áridos ligeros adecuados. Hacia el año 1917, en EE.UU, S. J. Hayde desarrolló un proceso mediante un horno tubular giratorio para expandir piedras pizarras y arcillas y obtener áridos ligeros resistentes con granos de poca densidad. Con este nuevo tipo de áridos se consiguió obtener por primera vez hormigones ligeros que presentaban una densidad claramente menor que la del hormigón común, teniendo la misma resistencia. Como primera aplicación, se probó este nuevo material en la construcción de cascos de buques en EE.UU. durante la primera guerra mundial. El hormigón utilizado, con árido de arcilla expandida, alcanzó una resistencia de 350

kg/cm<sup>2</sup>, con una densidad menor a 1800kg/m<sup>3</sup>. Hoteles y edificios en Kansas, y la calzada superior del puente colgante de San Francisco – Oakland, son ejemplos de las primeras utilizaciones del hormigón ligero armado, en los años veinte y treinta de este siglo.

Después de la segunda guerra mundial se aceleró el desarrollo del hormigón ligero. En los años cincuenta se construyeron muchos edificios con este material en Estados Unidos, debido al poco peso propio.

La producción de hormigón ligero de gran resistencia ya era posible en Europa durante la segunda guerra mundial, se construyeron barcos con estructura laminar de este material. A excepción de Norteamérica, el hormigón ligero estructural se adoptó lentamente en la construcción, hacia la mitad de los años sesenta. Hoy en día ocupa ya un lugar importante también en Europa.