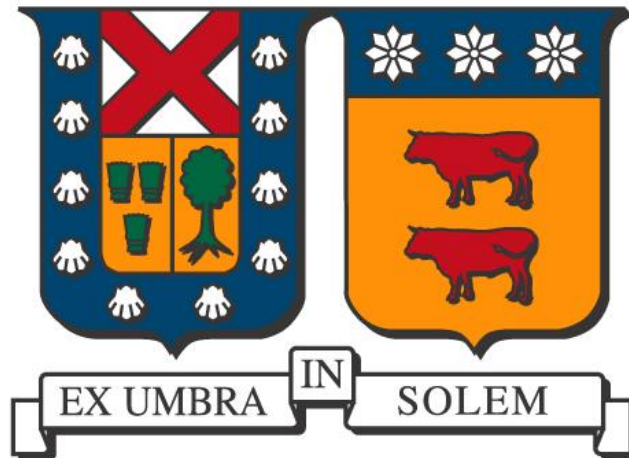


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO - CHILE



ESTUDIO DE MORTEROS ALIGERADOS CON AGREGADOS DE PLASTICO Y CAUCHO RECICLADO

ALFREDO ORLANDO TALAMILLA VEGA

Memoria para optar al Título de
Constructor Civil

Profesor Guía

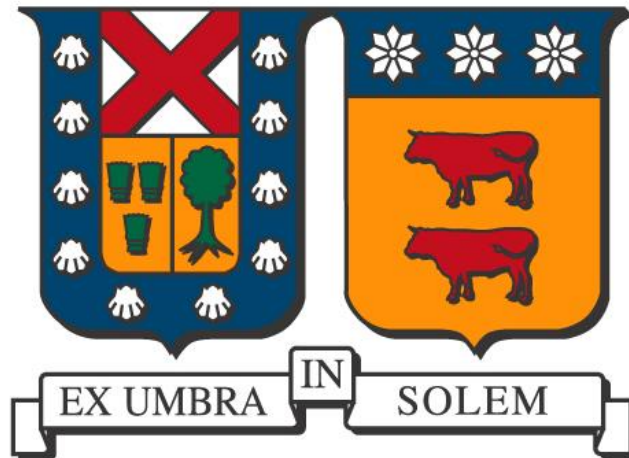
Sergio Carmona Malatesta

Noviembre 2018

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO - CHILE



ESTUDIO DE MORTEROS ALIGERADOS CON AGREGADOS DE PLASTICO Y CAUCHO RECICLADO

ALFREDO ORLANDO TALAMILLA VEGA

Memoria para optar al Título de
Constructor Civil

Profesor Guía

Sergio Carmona Malatesta

Noviembre 2018

Resumen

El presente estudio pretende analizar la factibilidad técnica de utilizar como áridos en el mortero de cemento residuos plásticos y caucho proveniente de neumáticos en desuso. Para este objetivo se elaboraron muestras de hormigones livianos, sustituyendo una fracción de arena por gránulos de polietileno de alta y baja densidad, en tanto que en otras se utilizó fibras de caucho comparando su desempeño a la resistencia a la compresión, densidad y trabajabilidad con respecto a un mortero convencional.

Para caracterizar estos tipos de hormigones se realizaron ensayos de docilidad y compresión simple a probetas de mortero con porcentajes de sustitución de un 10%, 30% y 50% en el caso de las muestras que se incorporó caucho y de un 10%, 20% y 30% en las que se incorporó polietilenos. Producto del análisis muestral, se determinó que al agregar materiales poliméricos a las mezclas de mortero se obtiene una disminución de las propiedades estudiadas acompañado de un aumento en la ductilidad del material apreciable en la mayoría de las dosificaciones.

Los resultados observados indican que los morteros con agregados de desechos poliméricos después de 28 días de curado muestran una disminución significativa en la resistencia a la compresión. Las muestras presentan una densidad de 1700 - 2200 [kg/m³], con una resistencia a la compresión menor a 30 [MPa].

Es posible observar que la trabajabilidad es inversamente proporcional al aumento de la dosis de sustitución agregada. Para mitigar estos efectos se analizaron muestras en las que se agregó un aditivo superplastificante a fin de mejorar su trabajabilidad. Producto de esta incorporación se observa que es posible mejorar en algunos casos la docilidad.

Abstracts

This study aims to analyze the technical feasibility of using plastic and rubber waste from disused tires, in partial replacement of sand and gravel in cement mortar. For this purpose, samples of lightweight concrete were created to replace a sand fraction, a part of the fraction was replaced by high and low density of polyethylene granules; in others, rubber fibers were used to compare the performance in terms of strength, compression, density and workability with respect to a conventional mortar.

To characterize these types of concretes were used a docility and simple compression tests to mortar test pieces with substitution percentages of 10%, 30% and 50% in the case of the samples that the rubber was incorporated, and 10%, 20% and 30% in which polyethylenes were incorporated. The product of the sample analysis determined that when adding polymeric materials to the mortar mixtures, it obtained a reduction in the properties studied, an increase in the ductility of the material that is appreciable in most dosages.

The results indicated that mortars with aggregates of polymer waste in a curing time of 28 days showed a significant decrease in compressive strength. The samples have a density of 1700 - 2200 [kg / m³], with a compressive strength of less than 30 [MPa].

It is possible to observe that the workability is inversely proportional to the increase of the dose of added substitution. To mitigate these effects, samples were analyzed in which a super-plasticizer additive was added in order to improve its workability. Product of this incorporation is possible to observe that it can be improve in some cases the docility.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS.....	8
2.1. OBJETIVO GENERAL	8
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3. MARCO TEÓRICO	9
3.1. MORTERO CONVENCIONAL.....	9
3.2. HORMIGONES ALIGERADOS	11
3.3. HORMIGÓN CELULAR	12
3.4. MORTEROS LIGEROS CON AGREGADOS NO CONVENCIONALES.....	14
3.5. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS DESECHOS SÓLIDOS EN CHILE	15
3.6. CONSUMO DE PLÁSTICO	16
3.6.1. <i>Reciclaje de plástico</i>	17
3.6.2. <i>Reciclaje Mecánico</i>	19
3.6.3. <i>Reciclaje Químico</i>	19
3.7. NEUMÁTICOS FUERA DE USO	20
3.7.1. <i>Recauchaje</i>	21
3.7.2. <i>Reciclaje en base a Trituración mecánica</i>	22
3.7.3. <i>Co-procesamiento (Valoración energética)</i>	22
3.8. ESTADO DEL ARTE	23
4. ETAPA EXPERIMENTAL	26
4.1. INVESTIGACIÓN PROPUESTA.....	26
4.2. PLAN DE TRABAJO.....	27
4.3. VARIABLES.....	28
4.4. MORTEROS ESTUDIADOS.....	28
4.5. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS	29
4.6. DENSIDAD REAL DE LOS MATERIALES	35
4.7. DOSIFICACIONES	35
4.8. ELABORACIÓN DE MORTEROS EXPERIMENTALES	37
4.9. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS	38
4.10. DESMOLDE DE LAS PROBETAS	38
4.11. CURADO.....	39
4.12. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN PARA MORTEROS ESTUDIADOS	40
4.12.1. <i>Ensayo de consistencia: Método cono de Abrams</i>	40
4.12.2. <i>Ensayo de consistencia: Método de escurrimiento mesa de sacudida</i>	41
4.12.3. <i>Ensayo a compresión</i>	42
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS DATOS	45
5.1. DOCILIDAD MORTEROS ESTUDIADOS	45
5.2. DENSIDAD DE LOS MORTEROS ESTUDIADOS	49
5.3. RESISTENCIA A COMPRESIÓN MORTEROS ESTUDIADOS	53
6. CONCLUSIONES	57
7. BIBLIOGRAFÍA.....	60
8. ANEXOS	62
<i>Resultados: Mitades de probetas de mortero con caucho 40x40x160 [mm].</i>	62
<i>Resultados: Probetas de Mortero con PEBD de 150x300 [mm].</i>	63
<i>Resultados: Probetas de Mortero con PEBD de 150x300 [mm].</i>	64
<i>Granulometría arena negra gruesa</i>	65

Índice de tablas

Tabla 1.-Cuadro comparativo de ventajas y desventajas del hormigón en la construcción.	10
Tabla 2.- Clasificación de los áridos ligeros.	12
Tabla 3.-Propiedades mecánicas del mortero celular.	13
Tabla 4.-Aplicaciones Hormigón celular según su densidad.	13
Tabla 5.-Composición de los residuos municipales.	16
Tabla 6.-Tipos de residuos plásticos.	18
Tabla 7.-Generación y valoración de los Neumáticos fuera de uso 2011-2016.	20
Tabla 8.-Ensayos de caracterización para morteros con agregados poliméricos.	26
Tabla 9.-Variables consideradas.	28
Tabla 10.-Morteros estudiados.	28
Tabla 11.-Aporte de agua y granulometría de la arena gruesa.	29
Tabla 12.-Propiedades físicas del caucho.	30
Tabla 13.-Propiedades físicas del plástico PEAD.	32
Tabla 14.-Propiedades del plástico PEBD (Pellet).	34
Tabla 15.-Densidad de los componentes utilizados en los morteros.	35
Tabla 16.-Dosificación Mortero Base.	35
Tabla 17.-Dosificación para un m3 de tipo de mortero con adiciones de polímeros.	36
Tabla 21.-Resultados asentamiento de cono para morteros con adición de PEAD.	45
Tabla 22.-Resultados asentamiento de cono para morteros con adición de PEBD.	46
Tabla 23.-Resultados escurrimiento para morteros con adición de caucho.	47
Tabla 18.-Resultados densidad morteros PEAD.	49
Tabla 19.-Resultados densidad morteros PEBD.	50
Tabla 20.-Resultados densidad morteros Caucho.	51
Tabla 24.-Resultados de resistencia a compresión mortero con adiciones de PEAD.	53
Tabla 25.- Resistencia promedio de morteros con adiciones de PEBD reciclado.	54
Tabla 26.-Resultados de resistencia a compresión mortero con adiciones de fibras de caucho reciclado.	55

Índice de gráficos

Gráfico 1.-Distribución de resinas termoplásticas en el mercado nacional.	16
Gráfico 2.-Resultados de resistencias a compresión de morteros con agregados de PVC.	24
Gráfico 3.- Resistencia a compresión de morteros con distintos tamaños de partículas de caucho.	25
Gráfico 4.-Granulometría del caucho.	30
Gráfico 5.-Granulometría chipeado de PEAD.	33
Gráfico 6.- Granulometría pelletizado de PEBD.	34
Gráfico 7.-Docilidad mortero con adiciones de PEAD.	46
Gráfico 8.-Docilidad mortero con adiciones de PEBD.	47
Gráfico 9.-Docilidad del mortero con adiciones de caucho.	48
Gráfico 10.-Densidad mortero con agregado de PEAD reciclado.	50
Gráfico 11.-Densidad mortero con agregado de PEBD reciclado.	51
Gráfico 12.-Densidad mortero con agregado de Caucho Reciclado.	52
Gráfico 13.-Resistencia a Compresión mortero con adiciones de PEAD.	53
Gráfico 14.-Resistencia a Compresión mortero con agregado de PEBD.	54
Gráfico 15.- Resistencia a Compresión mortero con agregado de Caucho Reciclado.	55
Gráfico 16.-Resistencia a compresión v/s Densidad	56

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1.- Hormigón ligero con arcilla expandida</i>	11
<i>Ilustración 2.-Proceso de Reciclado mecánico.</i>	19
<i>Ilustración 3.-Caucho proveniente recauchado de neumático fuera de uso.</i>	31
<i>Ilustración 4.-Estructura de cadena de Polietileno: a) Alta densidad. b) Baja densidad.</i>	31
<i>Ilustración 5.-Chipeado de Polietileno de alta densidad.</i>	33
<i>Ilustración 6.-Pelletizado de PEBD.</i>	34
<i>Ilustración 7.-Máquinas utilizadas para elaboración de las mezclas de mortero.</i>	38
<i>Ilustración 8.-Elaboración mezcla de morteros experimentales</i>	39
<i>Ilustración 9.-Preparación probetas Rilem para ensayos de esfuerzos.</i>	39
<i>Ilustración 10.-Asentamiento de cono de Abrams para morteros con agregados de PEAD y PEBD.</i>	40
<i>Ilustración 11.-Método de escurrimiento mesa de sacudida para morteros con agregados de caucho.</i>	41
<i>Ilustración 12.-Equipos utilizados para ensayo a compresión de probetas cilíndricas.</i>	42
<i>Ilustración 13.-Probetas cilíndricas de morteros con agregados de PEAD y PEBD.</i>	43
<i>Ilustración 14.-Equipos utilizados para ensayo a compresión de probetas prismáticas.</i>	44
<i>Ilustración 15.-Probetas prismáticas de mortero con agregado de caucho ensayadas a compresión.</i>	44

1. Introducción

En el último tiempo la alta demanda y creciente competencia en el sector de la construcción hace necesario que profesionales del área deban innovar constantemente en el uso eficiente de nuevos materiales, los cuales deben cumplir con los estándares de la calidad y lo, prescrito en la normativa de la construcción vigentes en Chile. Por otra parte, las tendencias ambientalistas han derivado en una orientación cada vez más ecológica en la búsqueda de materiales.

En este orden de ideas, el hormigón es uno de los materiales más utilizados en el mundo, el cual gracias a sus excelentes propiedades mecánicas, aporta a la población seguridad y durabilidad en sus edificaciones. Sin embargo, producto de la densidad de los componentes es uno de los materiales más pesados en la construcción generando un gran impacto ambiental.

La integración de los conceptos de sustentabilidad y respeto por el medio ambiente busca nuevas alternativas en el sector de la construcción que permitan aliviar el impacto ambiental que este provoca y así ser amigables en el planeta.

En el marco del proyecto “Hormigón Sustentable” desarrollado por el Programa de Iniciativas Estudiantiles y Académicas (PIEA), se busca estudiar hormigones livianos que se obtienen al sustituir porcentajes de áridos tradicionales por gránulos de plásticos y caucho reciclados provenientes de la industria del reciclaje regional.

Existen varias investigaciones sobre el comportamiento del mortero cuando se le añaden agregados no convencionales, como es el caso de los morteros con agregados de poliestireno expandido, caucho, hormigón celular y hormigón polímero. Estos materiales aportan al mortero propiedades aislantes y principalmente reducen el peso específico del hormigón, no obstante, se obtiene una disminución en la resistencia.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

- Analizar los efectos sobre las propiedades del mortero de cemento al incorporar plásticos y caucho reciclado en sustitución del agregado fino en la mezcla.

2.2. Objetivos Específicos

- Realización de pruebas que permitan analizar los efectos en propiedades físicas y mecánicas de la sustitución en especial las variables trabajabilidad, densidad, peso y resistencia a compresión que experimenta el mortero convencional al sustituir plástico y caucho.
- Analizar resultados a fin de determinar los eventuales usos de estos tipos de morteros aligerados en la construcción.

3.Marco teórico

Para cumplir los objetivos de la presente investigación se debe establecer los aspectos técnicos que permitan el análisis del comportamiento de morteros aligerados utilizando como agregado materia prima proveniente de la industria del reciclaje. Para estos efectos definiremos el hormigón y mortero convencional y su composición, para posteriormente estudiar el hormigón ligero generado en las muestras, planteando sus usos y aplicaciones en la construcción.

A fin de determinar la viabilidad de abastecimiento de materias primas para la producción estable de este tipo de mortero, se evaluará la situación de los distintos residuos sólidos en nuestro país y la reutilización de estos residuos como materia prima valiosa por medio de distintos métodos de reciclaje. Finalmente se analizará la posible incorporación de estos materiales en el mortero.

3.1. Mortero Convencional

Según la norma chilena NCh 2256-1 del 2013 define al mortero como “mezcla constituida por cemento, arena y eventualmente otro material conglomerante que con adición de agua reacciona y adquiere resistencia. También puede tener algún otro producto para mejorar sus propiedades siempre que cumpla los requisitos según su uso”.

El hormigón a diferencia del mortero posee áridos de mayor tamaño y proporción que son las gravas, los cuales aportan volumen y estructura de la mezcla haciéndolo más resistente a esfuerzos de carga.

Normalmente la relación para los morteros se presenta en una proporción de 1:3 en cuanto a cemento y árido respectivamente. Además, el coeficiente de agua que lleva esta mezcla también juega un rol importante en la mezcla, el cual se encuentra entre 0,40 y 0,70 dependiendo de su uso, donde se presentara una relación agua-cemento menor para elementos estructurales, mientras que si es utilizado para recubrimientos o morteros dicha relación será mayor. El tamaño del árido y su granulometría también influyen en la cantidad de agua y en la consistencia del hormigón, clasificándose, así como: secos, plásticos, blandos y fluidos.

Este material es uno de los más utilizados dentro del mundo de la construcción gracias a sus excelentes propiedades físicas y mecánicas, aportándole a la población seguridad y durabilidad en sus edificaciones. Sin embargo, también presenta ciertas desventajas como un excesivo peso y volumen, así como otras características que se pueden observar en la Tabla 1, donde se comparan dichos aspectos.

Tabla 1.-Cuadro comparativo de ventajas y desventajas del hormigón en la construcción.

Ventajas	Desventajas
-Resiste a esfuerzos de compresión y cuando es armado resiste a flexo tracción. -Es ideal estructuralmente para edificaciones, pavimentos y cimentaciones. -Larga vida útil debido a su alto grado de durabilidad. -Elevada resistencia al fuego. -Posee una trabajabilidad que le permite ser moldeada para distintos elementos.	-Excesivo peso y volumen. Presenta una densidad entre los 2.000 y 2.800 kg/m³. -Explotación y extracción de áridos naturales en masa, al largo tiempo provocara un déficit del recurso.

Fuente: Propia.

Las desventajas están asociadas principalmente al peso de los elementos que se requieren en las edificaciones, lo que lleva a utilizar grandes metros cúbicos de material, provocando un impacto ambiental notorio. Una mejora que podría proponerse para que este material sea más sostenible sería reducir su peso, para lograrlo se debe sustituir los áridos de la mezcla de hormigón por materiales de menor densidad, pero que cumplan con ciertas propiedades físicas para obtener un buen desempeño en la mezcla de mortero. Obteniendo así un hormigón más liviano y mucho más amigable con el medio ambiente.

El hormigón convencional contiene cerca de un 80% de agregado en su masa. Las operaciones de extracción, procesamiento, y transporte que implican tan grandes cantidades de agregado, consumen cantidades considerable de energía y de manera adversa afecta la ecología del lugar donde se extraen.

3.2. Hormigones Aligerados

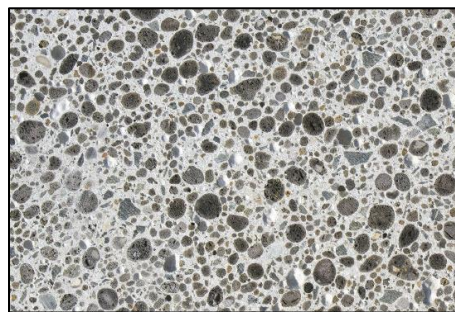
“Los hormigones ligeros que se emplean para la realización de elementos constructivos y con capacidad de carga, en los que se han utilizado, total o parcialmente, áridos ligeros, que presentan densidades comprendidas entre 1000 y 2000 [kg/m³]. Para su fabricación es preciso disponer de áridos adecuados, o sea que manteniendo en primer lugar una ligereza adecuada, sean sin embargo suficientemente sólidos, y que puedan obtenerse con continuidad y con una calidad siempre uniforme”. (Weigler & Karl, 1993).

Los áridos ligeros deben tener los granos de una densidad lo más baja posible, con una resistencia propia lo suficientemente elevada y calidad en la estructura uniforme. Existen áridos livianos de origen natural, como es el caso de la piedra pómez, la perlita y la vermiculita, utilizados para elementos no estructurales, debido a que la rigidez y resistencia propia del grano no son adecuadas para la elaboración un hormigón que soporte cargas. Estos áridos son utilizados en muros no portantes, pavimentos de bajo tráfico, relleno de cúpulas y techos.

Se dispone también de otros áridos ligeros de tipo artificial, como las arcillas y pizarras expandidas. Estos materiales son muy porosos y uniformes que pueden resistir grandes cargas, por lo que suelen ser utilizados para elementos estructurales. Estos áridos se obtienen mediante tratamiento a altas temperaturas en hornos rotatorios, en donde se generan gases de ciertos componentes de la materia prima, los cuales queda atrapada dentro de los granos y los expande.

Con estos agregados se pueden llegar a fabricar hormigones con resistencia que comprenden de 7 a 55 [MPa] a esfuerzos de compresión, y con densidades que van entre los 600 a 1400 [kg/m³]. La Tabla 2 muestra la clasificación de los áridos ligeros según la densidad y resistencia que pueden llegar alcanzar los hormigones.

Ilustración 1.- Hormigón ligero con arcilla expandida



Fuente: www.archiexpo.es

Tabla 2.- Clasificación de los áridos ligeros.

Clase de árido	Tipo de árido	Densidad de los granos (8-16mm) (kg/m ³)	Clase de resistencia que se puede alcanzar (MPa)	Densidad Hormigón (kg/m ³)
Baja consistencia	Arcillas expandidas	700 a 900	Hasta 15	≤1300
Consistencia Media	Pizarras y arcillas expandidas	1000 a 1300	25 a 35	1500 a 1700
Alta consistencia	Pizarras y arcillas expandidas	1200 a 1400	45 a 55	1600 a 1800

Fuente: (Weigler & Karl, 1993).

En caso de Chile, la utilización de hormigones ligeros se ha masificado introduciendo al mercado el hormigón celular, ya sea in situ o prefabricado como es el caso de los bloques y paneles. Este material ofrece una solución constructiva ideal cuando se requiere reducir peso en la estructura, como en las terrazas en edificaciones o losas que no resistan cargas demasiado grandes.

3.3. Hormigón Celular

El hormigón celular es un material mineral que se obtiene a base de arena de sílice, cemento, cal y un agente de expansión (aditivo espumante), siendo este responsable de la típica estructura micro alveolar que se genera durante el proceso de Fabricación. Se caracteriza por tener grandes poros, cuyos diámetros varían entre 0,2 y 2,0 milímetros, visibles a simple vista y constituyen el gran volumen vacío dentro del hormigón que lo hace más ligero. El hormigón celular se puede fabricar en diferentes densidades según su aplicación.

“Las propiedades mecánicas del hormigón o mortero celular dependen directamente de su densidad, llegando a disminuir su resistencia a la compresión hasta en un 75% con respecto al mortero corriente de densidad típica” (Lisama, 2000). Existen limitantes en cuanto a sus aplicaciones debido a su baja resistencia, siendo utilizado para soportar cargas ligeras y reducir el peso de elementos para no sobrecargar las estructuras.

Tabla 3.-Propiedades mecánicas del mortero celular.

Hormigón Celular		Edad 28 Días
Probeta	Densidad [kg/m ³]	Resistencia [MPa]
1	1300	4,9
2	1330	4,1
3	1280	5,3
Mortero		Edad 28 Días
Probeta	Densidad [kg/m ³]	Resistencia [MPa]
1	2290	32,5
2	2310	32,8
3	2280	33,6

Fuente: (Lisama, 2000).

En obras de edificación se ha desarrollado en los últimos años, se ha utilizado el hormigón celular tanto para sobrelosas como para la elaboración de elementos prefabricados, por ejemplo, bloques y paneles utilizados en la construcción de zonas de humedad en viviendas. A continuación, en la Tabla 4 se presentan algunas de las aplicaciones típicas en uso según su densidad.

Tabla 4.-Aplicaciones Hormigón celular según su densidad.

Densidad (kg/m ³)	Componentes	Tipo	Aplicación
300 – 600	-Cemento -Aditivo espumante	No Estructural	Se utiliza en azoteas y pisos como aislante termino y acústico, se aplica sobre suelos rígidos.
600 – 900	-Cemento -Arena -Aditivo espumante	No Estructural	Fabricación de bloques y paneles prefabricados, se utilizan en revestimiento de paredes, losas para aislamiento térmico y acústico en edificios residenciales y comerciales.
900 – 1600	-Cemento -Arena -Aditivo espumante	Estructural	Bloques, recubrimientos, paneles prefabricados de cualquier dimensión, paredes internas divisorias, sobrelosas para techos y pisos de edificios para usos comerciales e industriales.

Fuente: (Lisama, 2000)

3.4. Morteros ligeros con agregados no convencionales

El principal eje que se desarrolla este tema es el reemplazo de agregados naturales y convencionales utilizado en el mortero, por materiales alternativos que cumplan con las propiedades de áridos ligeros y que influyan positivamente en el hormigón. Se analizará así su comportamiento en su estado de fresco antes del fraguado y endurecimiento a los 28 días de haber sido hormigonado.

Es importante tener conocimiento de las características y propiedades del agregado que se incorporará en el hormigón, como lo son la forma, tamaño y superficie de los granos, su densidad aparente y real, y también la resistencia propia. Además, tener en cuenta la absorción de agua que logre alcanzar material y si influye en el agua de amasado de la mezcla. Con estas propiedades de los áridos se puede obtener un hormigón que proporcione las mismas ventajas de un hormigón ligero.

Existen varias investigaciones relacionadas de hormigones y morteros con áridos no convencionales desarrolladas en distintas partes del mundo, las cuales buscan la reutilización de materiales residuales que pueden cumplir su último ciclo de vida insertos en el hormigón. La reutilización de desechos se ha convertido en una alternativa atractiva para aliviar los problemas de eliminación. Dichos productos de residuos incluyen caucho de neumáticos fuera de uso, plástico reciclado, vidrio, botellas recicladas y escoria de carbón.

En esta etapa del estudio se presenta una revisión sobre los manejos de los residuos sólidos y la gestión que se está llevando a cabo en nuestro país, seleccionando los que pueden llegar a ser reciclados y reutilizados en distintas alternativas de valoración. Los plásticos y el caucho proveniente de neumático fuera de uso son materiales con excelentes propiedades y que pueden seguir siendo utilizados aportando grandes ventajas ambientales incorporadas en la mezcla de mortero, con el fin de demostrar la posibilidad de utilizar estos residuos de manera eficiente y sustentable.

3.5. Situación actual de los desechos sólidos en Chile

Atendida la creciente conciencia ambientalista, es de suma importancia que como país se sustituya la pobre visión de los residuos como simple basura destinados a vertederos o rellenos sanitarios. En efecto, los residuos constituyen una materia prima y fuente de trabajo de un importante sector, a partir los recolectores y toda la industria del reciclaje en general, quienes contribuyen a reducir, reutilizar y reciclar desechos de consumo diario para evitar una acumulación indeseada a lo largo del tiempo ayudando considerablemente al medio ambiente.

Los residuos son los desechos o basura de objetos que han perdido su vida útil y que posteriormente pueden ser eliminados o valorizados. El crecimiento económico y de la población ha llevado a un aumento del consumo de variados materiales cuyos residuos afectan al medio ambiente, lo que, además de disminuir la disponibilidad y calidad de estos elementos, ha generado impactos negativos adicionales para la salud y la calidad de vida de la población, tales como la generación de una cantidad excesiva de residuos y problemas para disposición final segura e inocua de ellos.

En Chile actualmente, los residuos domiciliarios que generamos superan los 7 millones de toneladas al año, sumado a esto, los residuos industriales alcanzan cifras de 10 millones de toneladas. A partir de estas cantidades, menos del 10% se recicla y el resto termina enterrado en un relleno sanitario o en un vertedero.

El 1 junio 2016 El Congreso Nacional aprobó el proyecto de Ley N° 20.920 que establece el marco para la gestión de residuos y responsabilidad extendida del productor. Esta iniciativa legal fijará metas anuales de recuperación de aceites lubricantes, artículos eléctricos y electrónicos, envases y embalajes, pilas, baterías y neumáticos una vez que terminan su vida útil. El objetivo es incrementar las tasas de reciclaje del país de un 10% a más de un 30%. Con esta ley, Chile se convierte en pionero en Latinoamérica en establecer una política pública eficiente en esta materia (MMA, 2016).

Con esto, la industria del reciclaje en Chile adquiere mayor formalidad, y a su vez se haga responsable legalmente todo quien genere desechos sólidos. Se Pretende lograr una organización y gestión de la recuperación residuos derivados de su producción.

Dentro de los tipos de residuos sólidos no peligrosos están los papeles y cartones, textiles, vidrios, metales, material orgánico, plásticos, neumáticos fuera de uso y otros.

Tabla 5.-Composición de los residuos municipales.

Tipo de residuo Composición	(%)
Papeles y Cartones	12,4
Textiles	2,0
Plásticos	9,4
Vidrios	6,6
Metales	2,3
Materia Orgánica	53,3
Otros	14,0

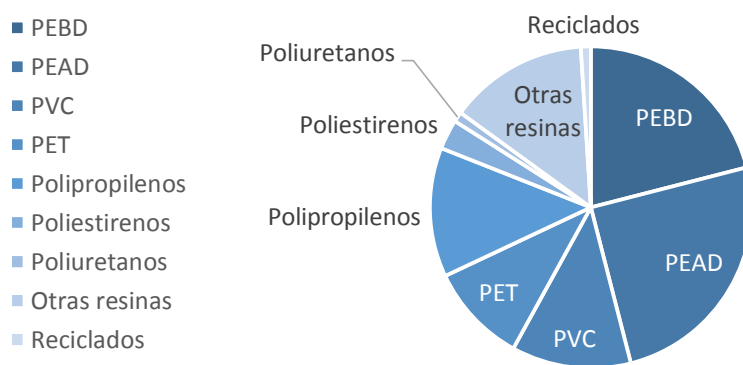
Fuente: Primer reporte de manejo de residuos sólidos en Chile.

3.6. Consumo de plástico

Los pasticos se han transformado en un material indispensable para nuestra sociedad por tener una gran versatilidad, ligero, durable y resistente a químicos, sin embargo, su degradación una vez que se desecha es dificultosa. La producción de plástico a nivel mundial se registró con 335 millones de toneladas de plástico en el año 2017 y con un aumento anual de aproximadamente 4% (www.plasticseurope.org/es).

Según cifras de la Asociación de Industriales de Plástico (Asiplas) en Chile se registran más de 900.000 toneladas consumidas de plásticos en el mercado hasta el 2015. La comercialización de resinas termoplásticas se concentró en los polietilenos de alta y baja densidad (PEAD y PEBD), y de Tereftalato (PET) con un 56%; asimismo un 29% corresponde al Polipropileno (PP), Policloruro de Vinilo (PVC), Poliestireno (PS) y Poliuretano (PU). El resto de las materias primas, lo conforman otros tipos de resinas (14%) y, finalmente, con una participación muy marginal, aparecen los materiales reciclados con un 1%.

Gráfico 1.-Distribución de resinas termoplásticas en el mercado nacional.



Fuente: Asiplas, 2017.

La industria de las resinas termoplásticas está enfocada a producir envases y embalajes, dirigidos a distintos tipos de empresas, incluida la de alimentos para consumo, seguida por la de productos para la minería, construcción y agroindustria.

Ahora bien, en Chile existen tres servicios que participan en la industria del plástico. Están los proveedores nacionales e internacionales de resinas o polímeros vírgenes para directa producción nuevos plásticos; las empresas fabricantes propiamente tal y; los proveedores de plásticos reciclados, que abastecen a las fábricas para la producción de otras líneas de productos, esto gracias a la restricción que existe de utilizar sólo materia prima virgen en las industrias de alimentos y farmacéuticas, entre otras.

Sin embargo, la producción y el consumo de plástico, que a la larga deriva en la generación de residuos sólidos, conlleva un impacto ambiental negativo importante. La producción de plástico requiere de una cantidad de recursos considerables, como los combustibles fósiles, usos de químicos nocivos para la salud, además de las emisiones de dióxido de carbono. Y una vez que el material es utilizado se transforma rápidamente en residuo, siendo este último el más perjudicial para el medio ambiente, ya que tarda mucho tiempo en degradarse siendo enviado en muchos casos a rellenos sanitarios o vertederos, en donde permanece por varios años acumulándose de manera descontrolada.

El plástico también tiene un gran impacto sobre los océanos, donde el 90 % de los desperdicios que son encontrados pertenece a este tipo de polímero que navega sin rumbo de océano en océano. Esto ha causado un déficit en la fauna marina, debido a que los animales no diferencian el plástico y lo confunden con alimento.

3.6.1. Reciclaje de plástico

El reciclaje de plástico permite valorizar el material para un último uso en su ciclo de vida, lo que resulta beneficioso para reducir la cantidad de residuos desechados en vertederos, además contribuye significativamente ahorro de energía y combustibles fósiles.

Sin embargo, no todos los plásticos son susceptibles de reciclar por su compatibilidad con el uso y sus propiedades particulares. Podemos distinguir los termoplásticos que son plásticos fácilmente reciclables ya que funden cuando se calientan y por tanto se pueden moldear repetidas veces sin que sus propiedades originales se alteren demasiado. Sin embargo, durante los distintos ciclos de reprocesado van sufriendo modificaciones por lo que no pueden ser reciclados más de 5 ó

7 veces. Los termoplásticos más conocidos son: PEBD, PEAD, PP, PET, PVC y PS. En la Tabla 6 se presenta los diferentes termoplásticos que son posibles de reciclar.

Por otro lado, existen los termoestables, los cuales son difíciles de reciclar ya que están formados por polímeros con cadenas ligadas químicamente (con enlaces transversales) que hacen necesaria la destrucción de su estructura molecular para poder fundirlos y esto conlleva a una alteración de sus propiedades originales.

Tabla 6.-Tipos de residuos plásticos.

Nombre	Número Sigla	Descripción	Aplicaciones	Usos después del reciclado
Polietileno tereftalato	 PET	Transparente y resistente	Botellas desechables para bebidas, bandejas de torta y frutas	Fibras y textiles para alfombras, lonas, cuerdas, hilos
Polietileno de alta densidad	 PEAD	Plástico duro y resistente.	Bolsas tipo camiseta, envases de detergente, champús, bidones, tapas de botellas.	Bolsas industriales, botellas de detergente, contenedores, tuberías.
Cloruro de polivinilo	 PVC	Plástico duro y rígido	Tuberías y elementos de desagüe.	Mangueras, tuberías, envases de detergente, contenedores.
Polietileno de baja densidad	 PEBD	Plástico flexible y suave	Bolsas de supermercado, de basura y filmes de embalaje.	Films para embalaje, uso agrícola y construcción, bolsas de basura,
Polipropileno	 PP	Plástico duro y flexible	Envases de helado, bombillas, vasos no desechables, contenedores de alimentos.	Cajas, contenedores, tachos de basura.
Poliestireno	 PS	Plástico rígido y quebradizo.	Recipientes para yogurt y postre. Vasos, platos y cubiertos desechables	Ganchos de ropa, accesorios de oficina, cajas de CD's.

Fuente: www.recytrans.com

Actualmente existen ciertas limitaciones con respecto al reciclaje completo y eficiente del plástico, como es la contaminación de los desechos con tierra, materia orgánica y metales que pueden dañar los equipos utilizados en el procesamiento. Los plásticos no son materiales homogéneos como el aluminio o papel, sino que poseen diferentes estructuras y propiedades moleculares y cada componente plástico se comporta distinto, por lo que es fundamental separar los tipos de plásticos al momento de reciclar. Existen dos tipos de reciclaje de plástico:

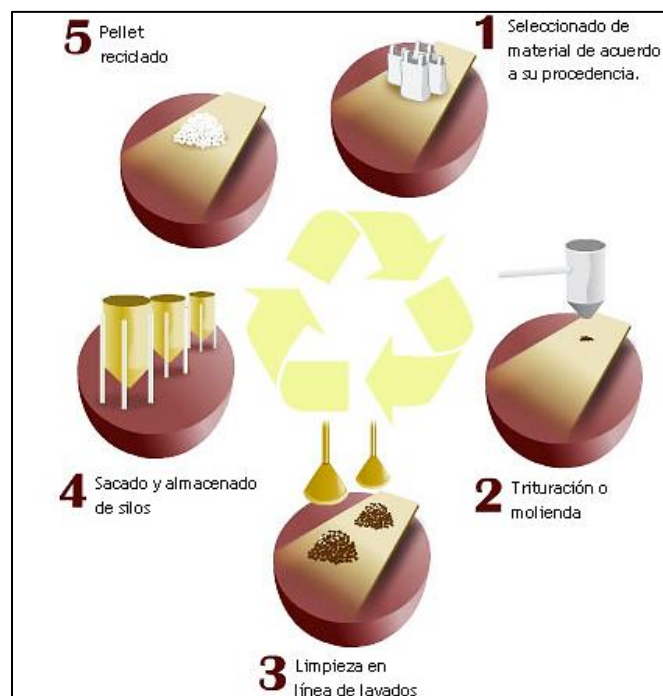
3.6.2. Reciclaje Mecánico

El reciclaje mecánico de plásticos se refiere a procesos que implican la fusión, trituración o granulación de plásticos residuales. Los plásticos deben clasificarse previamente debido a que no todos poseen la misma composición separándolos por tipo de polímero y densidades. El siguiente paso es la trituración o molienda, donde el material experimenta una reducción de su volumen cercano al 80%. Luego se lleva a un proceso de lavado y secado, en donde se desprenden los restos orgánicos y otros contaminantes presentes en los plásticos. Finalmente, el material triturado, limpio y homogéneo es extruido obteniendo como producto el pellet reciclado.

3.6.3. Reciclaje Químico

Este tipo de reciclaje consiste en romper las cadenas de polímeros en sus monómeros constituyentes, que a su vez pueden usarse nuevamente en refinerías o en la producción química. Este reciclaje es más eficiente a eliminar las impurezas que el reciclaje mecánico, pero es necesario tener una gran cantidad de material plástico desechado para que este proceso sea económicamente viable. El plástico puede reciclarse por modificación química o despolimerización. Las dos formas de lograr la despolimerización son la hidrólisis (descomposición química) y la pirolisis (descomposición térmica).

Ilustración 2.-Proceso de Reciclado mecánico.



Fuente: www.cambiaso.cl/prod_lineareciclaje.

3.7. Neumáticos fuera de uso

Se estima que mundialmente la producción de neumáticos alcance niveles cercanos a los 3.500 millones de unidades. Alrededor de 1.000 millones de unidades son fabricadas cada año y esa cifra aumentará en el futuro próximo con el crecimiento en el mundo en desarrollo.

Los desechos generados por este elemento son característicos de las sociedades desarrolladas modernas dependientes del automóvil y otros medios de transporte similares, de igual manera los sectores de minería y construcción aportan con la generación de NFU. Gestiones a nivel mundial de erradicar estos desechos voluminosos han llevado a innovar en la búsqueda de alternativas de valoración para que los desechos no terminen de forma descontrolada e ilegal en sitios eriazos, los que con el paso del tiempo se van transformando en vertederos ilegales y micro basurales. En el caso de USA, Japón y la Unión Europea, recuperan el 100% de estos residuos para su valoración como material o energía.

Según datos entregados por la Cámara de la Industria del Neumático de Chile (CINC), se generan aproximadamente 130 mil toneladas de NFU aproximadamente por año en nuestro país, como se muestra en la siguiente tabla los vehículos pesados y livianos aportan en un 75% a esta acumulación de desechos. Por su parte los sectores industriales, agrícola, construcción y minería contribuyen con el 25% restante. Lo preocupante es que la mayoría de estos residuos de NFU generados en el país tienen una disposición final desconocida, solo 10% del total de los NFU es reutilizada en el proceso de recauchaje y menos del 7% es valorizado en procesos de reciclaje o la incineración para producir energía.

Tabla 7.-Generación y valoración de los Neumáticos fuera de uso 2011-2016.

Generación y Valoración de NFU (valores en toneladas)						
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Total Generación NFU	116.759	131.883	146.926	130.231	144.335	132.183
Recauchaje	14.183	15.152	13.147	11.523	10.860	9.726
Reciclaje	3.775	5.486	6.222	6.370	5.271	5.926
Co-procesamiento	2.119	1.926	918	651	456	414
Total Valoración NFU	5.894	7.412	7.140	7.021	5.727	6.340
Total % Valoración NFU	5.7%	6.3%	5.3%	5.9%	4.3%	5.2%

Fuente: (CINC, 2017).

En el país no existen sitios autorizados para la disposición final de NFU, ya que está prohibida su eliminación en relleno sanitario junto con el resto de los residuos, y el mercado de la valorización masiva de los NFU en Chile aún es limitado. Existen distintos métodos para darle un último uso a los neumáticos, como es el caso de la reutilización o recauchaje, el reciclaje en base a trituración mecánica o química, y además los desechos de caucho obtenidos de los métodos mencionados son transformados en materia prima para la valorización energética en hornos cementeros. Además, Existen algunos proyectos enfocados a la valorización de desechos de caucho en mezclas asfálticas para carreteras.

Hasta el año 2013 se verificaba el reúso a través del proceso de recauchaje en el caso de neumáticos de mayor tamaño, así como su valorización energética como combustible alternativo en plantas cementeras (en particular en la Planta de Cemento Melón en la V Región), uso directo en infraestructura constituyendo muros de contención para control de erosión o delimitaciones y uso en rellenos sanitarios como protección de taludes. Adicionalmente se verificaban algunas iniciativas municipales para reducir el problema de su acumulación buscando reutilizarlos en parques y similares. Existen también algunos proyectos enfocados a la valorización de desechos de caucho en carreteras de asfalto. (Acuerdos producción Limpia, MMA 2013).

3.7.1. Recauchaje

El recauchaje es un proceso mediante el cual se alarga la vida útil de un neumático reemplazando su banda de rodadura por una nueva de características similares o mejoradas. Con el recauchaje se crea un sistema eficiente de reciclaje, ya que utiliza un 80% del neumático original, es decir se reemplazarían de 1 a 2 kg de goma de caucho, y evitando un desperdicio inútil del resto del neumático. Sin embargo, no todos los tipos de neumáticos pueden pasar por una renovación o reencauche, pues no todos poseen las mismas características, por lo que hace limitado el proceso.

Si bien se recupera una parte importante del neumático, el desecho obtenido producto del raspado del neumático son fibras de caucho de diferentes tamaños, con largos que varían entre 40 y 0,5 milímetros, las cuales se pueden considerar un subproducto del proceso que sirve de materia prima para valoración energética en cementeras y también para la elaboración de mezclas asfálticas.

3.7.2. Reciclaje en base a Trituración mecánica

Este método de reciclaje consiste en que los NFU son triturados mediante medios mecánicos (molinos o cuchillas) hasta su reducción a material particulado de tamaño adecuada al fin que se le quiera dar previa separación, retiro de metales por medio de imanes, y materiales textiles por aspiración.

El caucho obtenido por el proceso ambiental se clasifica según el tamaño de las partículas en Neumáticos cortados, Neumáticos triturados en astillas (Chips), caucho en polvo y caucho en migas. El tamaño de los granos es bastante variado, pudiendo ir desde más de 300 mm cada corte, hasta material pulverizado, con tamaños menores a 0,8 milímetros.

En general, los productos resultantes de este proceso son de alta calidad y limpio de todo tipo de impurezas, facilitando la utilización de este material en nuevos procesos y aplicaciones.

3.7.3. Co-procesamiento (Valoración energética)

Este proceso consiste en convertir los residuos en un material con características tales que pueda considerarse en combustible o materia prima alternativa para un proceso industrial específico como fuente energética.

Una primera instancia de gestión fue desarrollada por la empresa Goodyear con su planta en Maipú, estableció un plan de gestión de NFU junto a la Cementera Melón, a fin de incorporar como combustible alternativo los NFU a los procesos generados en su planta.

La valoración energética de neumáticos fuera de uso en la industria permite aprovechar su alto poder calorífico, convirtiendo un residuo en un recurso. Sin embargo, la incineración de estos desechos podría generar un mayor impacto ambiental, si no es que no se regula los tratamientos adicionales para una gestión correcta de estos gases y cenizas.

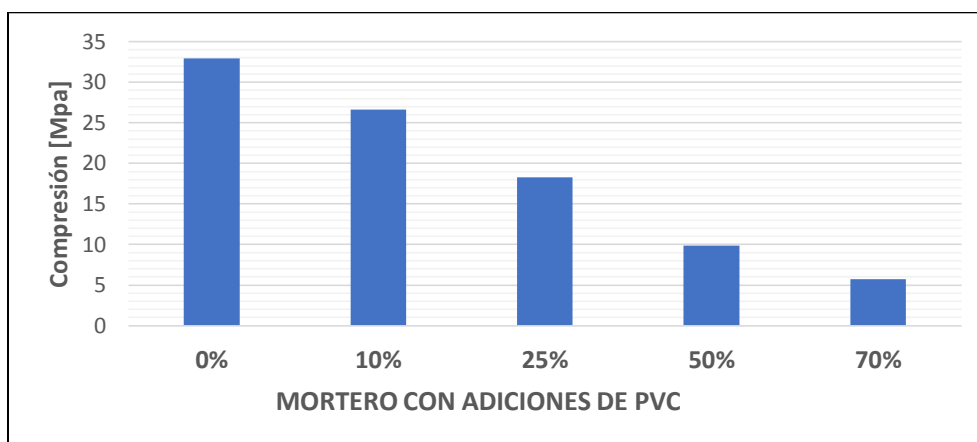
3.8. Estado del Arte

Antecedentes Mortero con agregados de plástico y caucho reciclado:

Recientemente se han desarrollado ciertas investigaciones sobre el comportamiento de morteros y hormigones con agregado de materiales no convencionales con el fin de cumplir una función y compatibilidad en la mezcla. Se han experimentado con diversos materiales inertes como es el caso del caucho en distintos formatos (fibras y gránulos), además de polímeros en distintas composiciones, formas y densidad. A continuación, se presentarán algunos estudios más relevantes acerca de la utilización de materiales no convencionales, analizando las propiedades físicas y mecánicas que puede lograr los morteros y hormigones con estos tipos de adiciones aprobando su factibilidad en ciertas aplicaciones.

En el *Estudio de Hormigones y Morteros Aligerados con Agregado de Plásticos reciclados como Árido y Carga de la Mezcla*, realizado en la Universidad Politécnica de Cataluña, se utilizó gránulos de plástico reciclado como agregado en la mezcla en sustitución de una fracción de árido natural. Se prueban diferentes dosificaciones para determinar su resistencia a compresión, densidad real y la consistencia de la mezcla. Para el estudio se utilizó cemento portland, arena fina y PVC reciclado en gránulos de 4 milímetros de diámetro, además se añadió un aditivo fluidificante para hacer la mezcla más manejable, en cantidades del 1% del cemento. Para dosificación del mortero se estableció de 1:3 y una sustitución de plástico del 0%, 10%, 25%, 50% y 70% con una relación agua cemento de 0,52; 0,51; 0,50; 0,48 y 0,47 respectivamente. A partir de estas mezclas se elaboraron probetas prismáticas (40x40x160 [mm]). Los resultados obtenidos registran una reducción de la densidad directamente proporcional al contenido de agregados plásticos, a medida que el mortero se hace más ligero va perdiendo propiedades mecánicas disminuyendo notablemente su resistencia a compresión. Para un reemplazo de 50% de agregado de plástico se registró una reducción de hasta un 70% con respecto a mortero convencional.

Gráfico 2.-Resultados de resistencias a compresión de morteros con agregados de PVC.



Fuente: (Pozo, 2012)

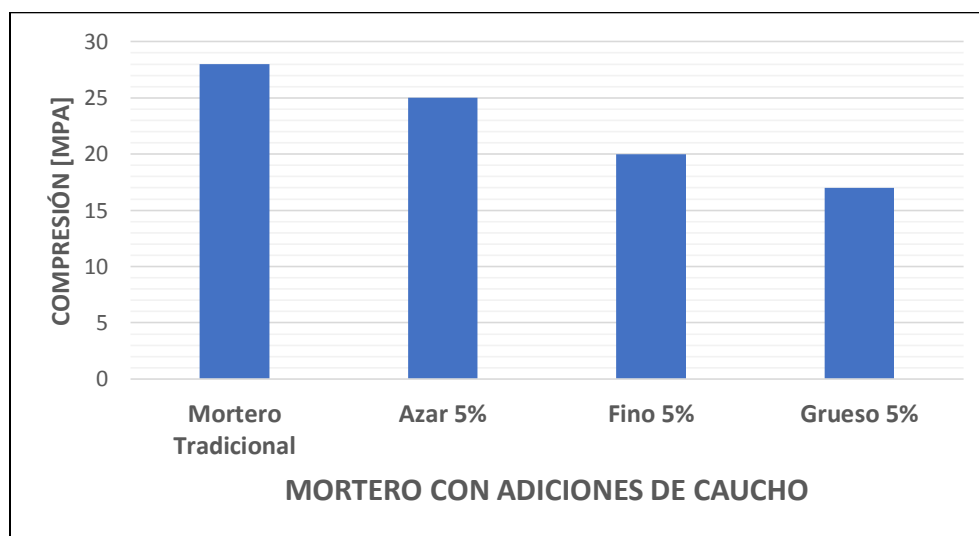
En un artículo de revista especializada “Waste Management” titulada “*Use of recycled plastic in concrete: A review*” (Siddeque ,Khatib y Kaur), analizaron los resultados de distintas investigaciones concluyendo en que los agregados de plásticos pueden ser utilizados de manera efectiva y factible para reemplazar agregados convencionales. El uso del plástico reciclado en el concreto redujo la densidad aparente del concreto en general, de un 2,5 a 13% para hormigones que contienen del 10 al 50% de agregado plástico. La resistencia a compresión disminuyó de 48 a 19 MPa a medida que se aumentaba el contenido de plástico. La reducción a la resistencia a compresión fue entre 34% y 67% con respecto al hormigón convencional. Sin embargo, a medida que el plástico fue aumentando su contenido en la mezcla, las fallas fueron más dúctiles, y las probetas fueron capaces de resistir la carga unos minutos más luego de la falla, sin desintegrarse por completo.

A partir de revisión anterior se obtienen antecedentes de Corea del Sur en donde investigaron la influencia del agregado liviano de los residuos de botellas de plásticos (PET) sobre la densidad, trabajabilidad y resistencia a compresión del concreto. Las dosificaciones de mezclas de hormigón se establecieron para relaciones de agua-cemento 0.45, 0.49 y 0.53 y la sustitución de residuos de plástico fueron 0%, 25%, 50% y 75% en volumen del agregado fino. La densidad de las mezclas de hormigón disminuyó con el aumento del contenido de plástico. Para el caso de la trabajabilidad informaron que el valor de asentamiento aumento con el aumento en la relación agua-cemento y la relación de reemplazo, atribuyendo esto a la forma esférica y lisa del material

añadido, además que el plástico no absorbe agua. En cuanto a la resistencia a compresión, esta disminuyó con el aumento de los agregados de PET.

Por su parte en un documento titulado *“Estudio de concreto elaborado con caucho reciclado de diferentes tamaños de partículas”* realizado en la Universidad Central de Venezuela (2007), se analiza las influencias de la adición de la raspadura de las bandas de rodamiento de los neumáticos en el hormigón. El cemento utilizado es Portland y las mezclas tuvieron una relación agua-cemento constante en 0,45 se sustituyó parte de la arena que se adiciona al concreto por caucho, el contenido de grava se mantuvo constante. El porcentaje de caucho utilizado fue de 5% en peso y los tamaños promedio de las partículas de caucho fueron mayores o iguales a 1,19 mm (Grueso), menores a 1,19 mm (fino) y una combinación al azar de ambos. Las partículas presentan una superficie rugosa, cuyas formas son irregulares y de diferentes dimensiones. Los valores de resistencia a la compresión de las mezclas a la edad de 28 días mostraron que los compuestos con los tamaños de caucho fino y grueso obtuvieron una disminución bastante pronunciada al compararlos con los valores del hormigón tradicional, siendo el porcentaje de disminución de 26 y 36%, respectivamente. En cambio, cuando el tamaño de la partícula es al azar (fino y grueso) el valor de esta propiedad es ligeramente menor al del concreto tradicional teniendo una variación menor al 8%.

Gráfico 3.- Resistencia a compresión de morteros con distintos tamaños de partículas de caucho.



Fuente: (Albano & Camacho, 2007)

4. Etapa Experimental

Considerando lo que se expuso en el punto anterior, vale decir en el “Marco Teórico”, se diseña el proceso experimental elaborado a partir de los conocimientos y experiencias previas contenidas en las investigaciones anteriormente reseñadas; se comparan sus metodologías y resultados con los que se obtendrán producto del presente estudio. Se plantean los pasos a seguir y se determina las características que debe tener un mortero aligerado con los agregados de plástico y caucho reciclado en las muestras. Finalmente se selecciona el tipo de probeta adecuado que se utilizará y los ensayos a los cuales se someterán las muestras.

4.1. Investigación Propuesta

En este presente proyecto se ensayará morteros aligerados empleando materia prima procedente de subproductos de la industria del reciclaje. Para esto, se analizarán las propiedades físicas y el comportamiento mecánico de las muestras en su estado sólido. También se espera analizar las propiedades que presenta en estado fresco, analizando factores tales como la segregación y la fluidez del material a fin de determinar la consistencia de la mezcla.

Los ensayos que se realizarán para poder cumplir con los objetivos propuestos y caracterizar estos tipos mortero se exponen en la siguiente tabla 8 que se inserta a continuación:

Tabla 8.-Ensayos de caracterización para morteros con agregados poliméricos.

Ensayo	Norma	Descripción
<i>Ensayo de compresión</i>	NCH 1037	Probetas cilíndricas de 15 [cm] de diámetro y 30 [cm] de altura sometidas a cargas de compresión.
<i>Ensayo a la compresión</i>	NCH-158	Probetas prismáticas 40x40x160 [mm] para ensayos de compresión y flexotracción
<i>Ensayo Asentamiento cono de Abrams</i>	NCH 1019	Permite medir la docilidad del hormigón en su estado fresco por la disminución de altura al momento de ejecutar el ensayo.
<i>Ensayo Método de escurrimiento mediante la mesa de sacudida</i>	NCH 2257/1	Determina la fluidez del mortero fresco utilizando una mesa de sacudida y moldes, generando un escurrimiento de la mezcla mediante pequeños saltos de la mesa a una frecuencia controlada.

4.2. Plan de trabajo

La planificación de la etapa experimental considera la elaboración de una serie de probetas de mortero con diferentes porcentajes de sustitución de árido fino por agregado de polimérico reciclado, las cuales se someterán a los ensayos de caracterización ya descritos. Cada mortero experimental dispondrá una dosificación, para los cuales se elaborarán una serie de 5 probetas. El diseño de las mezclas se calcula según una dosificación base de hormigón, la cual se modificará paulatinamente a medida que se sustituya cierto volumen del agregado fino por el agregado polimérico reciclado.

En una primera etapa se elaborarán 20 probetas tipo Rilem de mortero con adición de caucho proveniente del reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU) sustituyendo arena en porcentajes de 10%, 30% y 50%, además de un mortero referencial sin adición que se utilizarán como parámetro de comparación. Para ello se seguirá los procedimientos y equipos indicados en la norma NCh 158. Se opta por elaborar probetas prismáticas normalizados de dimensiones de 40x40x160 [mm], debido a que el tamaño del grano de caucho no supera los 6 [mm].

En la segunda etapa se confeccionarán morteros con adiciones de Polietileno de alta y baja densidad, en formato de chip y pellets respectivamente. La sustitución en porcentaje de arena será de 10%, 20% y 30% para ambos materiales. Debido a la granulometría del formato de los plásticos adquiridos se opta por elaborar 5 probetas cilíndricas de dimensiones 150x300 [mm] para cada dosificación de material, más 5 probetas de mortero sin sustitución para usar como patrón de comparación, resultando un total de 35 cilindros para ser ensayadas a esfuerzos de compresión.

Al momento de elaborar las mezclas de mortero se controlará la docilidad según los parámetros que se abordarán a continuación. Transcurridas 48 horas del hormigonado de las probetas se procederá al descimbre y posteriormente al traslado de estas a una cámara de humedad por un período de 28 días para finalmente ser sometidas a ensayo. Todas las etapas de este estudio se llevarán a cabo en dependencias del Laboratorio de Ensaye de Materiales LEMCO en las dependencias de la Universidad Técnica Federico Santa María.

4.3. Variables

Con relación a las variantes establecidas en este estudio Se tomará como muestra inicial y patrón de comparación un mortero base, al cual se modificará su dosificación sustituyendo diferentes porcentajes de volumen del árido fino por los materiales reciclados que serán sometidos a experimentación. Se estima que el mortero pierda docilidad al trabajarlo en su estado fresco a medida que aumente la cantidad de caucho y plástico, obedeciendo a los criterios de trabajabilidad previamente establecidos, por lo que se decide variar la proporción del aditivo superplastificante para alcanzar una consistencia adecuada.

Los parámetros de Docilidad para los morteros son los siguientes:

- Cono de Abrams: 6-9 centímetros.
- Mesa de sacudida: 150-210 milímetros.

Tabla 9.-Variables consideradas.

Variable	Sustitución de agregado
Fibras de caucho reciclado	10% - 30% - 50%
HDPE Polietileno de alta densidad (chips)	10% - 20% - 30%
MDPE Polietileno de media densidad (pellet)	10% - 20% - 30%
Aditivo superplastificante	0,5% a 1,25%

4.4. Morteros estudiados

Como se señaló anteriormente, se elaborarán 3 tipos de morteros experimentales, además de un mortero base para comparación definido como parámetro de comparación. La dosis de cemento se mantendrá constante, al igual que la relación agua - cemento de modo que no se afecte la resistencia del mortero. De este modo se observará y analizará el comportamiento de los materiales poliméricos añadidos a la mezcla y sus efectos en las propiedades del mortero resultante. Cada dosificación dispondrá de 5 probetas para ensaye y de este modo se podrá analizar su comportamiento físico y mecánico al ser sometidas a diferentes cargas de compresión.

Tabla 10.-Morteros estudiados.

Morteros estudiados	Mortero. Ref.	Mortero con Caucho			Mortero con PEBD			Mortero con PEAD			Total Probetas
% Sustitución de Arena	0	10	30	50	10	20	30	10	20	30	
Nº Probetas Rilem	5	5	5	5							20
Nº Probetas Cilíndricas	5				5	5	5	5	5	5	35

4.5. Propiedades de los materiales utilizados

Cemento

Cemento Melón Especial, Este cemento se fabrica en la Planta Melón bajo la Norma Chilena 148.Of68 "Cemento, Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales". Según esta norma, el cemento "Melón Especial" es un Cemento Portland Puzolánico", Grado corriente" especificaciones técnicas se pueden encontrar en el anexo materiales.

Agua

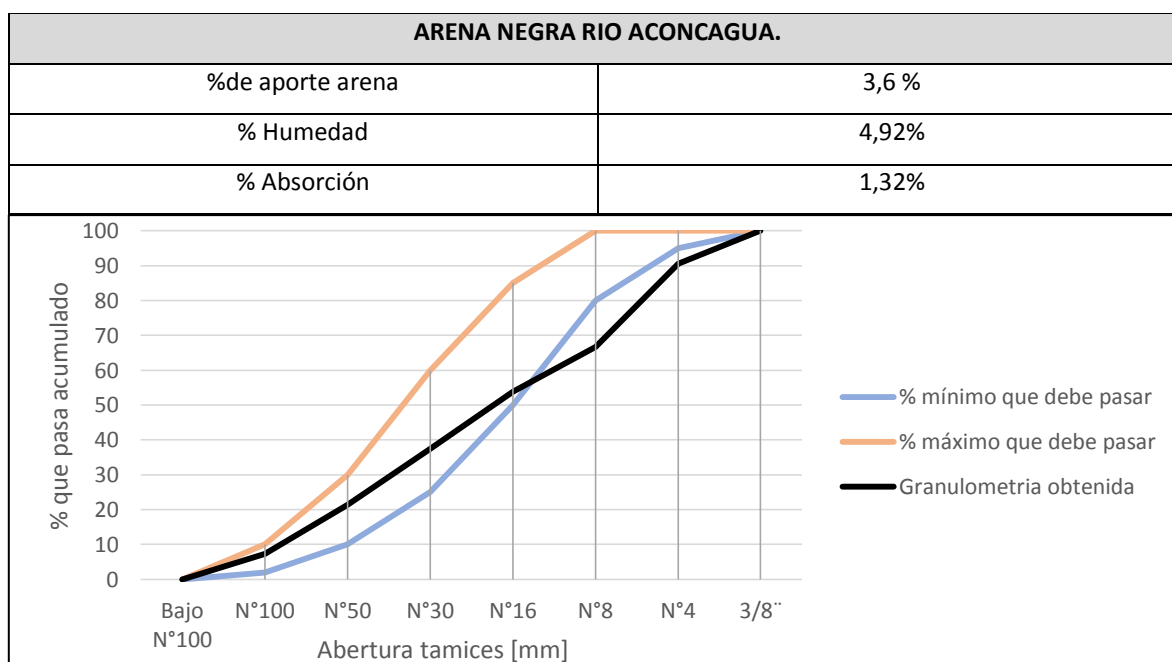
El agua utilizada en la fabricación del mortero es obtenida de la red de agua potable del laboratorio, obedeciendo los estándares de calidad que necesita la mezcla de mortero.

Arena

La arena utilizada corresponde es del tipo gruesa, la cual se sometió a un estudio granulométrico bajo lo estipulado en norma NCh 165 Of 2009. En cuanto a los requisitos que deben cumplir los áridos, estos se deben regir por la norma NCh 163 Of 2013.

Al momento de utilizar la arena calculada en las dosificaciones es importante considerar el porcentaje de aporte de agua libre determinando así el porcentaje de humedad y de absorción que este posee (tabla 9). Con estos datos será posible corregir por humedad el árido para no variar la relación agua cemento de la mezcla.

Tabla 11.-Aporte de agua y granulometría de la arena gruesa.



Caucho

El caucho utilizado es obtenido de las raspaduras de las bandas de rodadura mediante un proceso de recauchaje de neumáticos, suministrado por la empresa INSAMAR. Este material se dispone en un formato con granulometría variada observándose un porcentaje de fino mezcladas con fibras de distintos tamaños. Se realizó una granulometría del material ocupando el fino bajo malla #8.

Estos residuos de neumáticos están constituidos por varios polímeros naturales y sintéticos: Caucho natural (NR), Estireno butadieno (SBR), Polibutadieno (PB), Polisoprenos Sintéticos (IR). La combinación de cauchos naturales y sintéticos se realiza de modo que los primeros proporcionen elasticidad y resistencia mecánica, y los segundos estabilidad térmica. Además, a la mezcla de cauchos se les adicionan diferentes compuestos que actúan sobre las propiedades de los materiales.

Tabla 12.-Propiedades físicas del caucho.

Propiedad Material	Polietileno de baja densidad (PEBD)
Densidad [gr/cm ³]	0,95
Punto de combustión [°C]	300-450
Propiedad del grano	Fibrillas de caucho
Textura	Rugosa
Estructura interior	Poroso, gran cantidad de vacíos.
Forma del grano	Fibras alargadas
Color	Negro

Gráfico 4.-Granulometría del caucho.

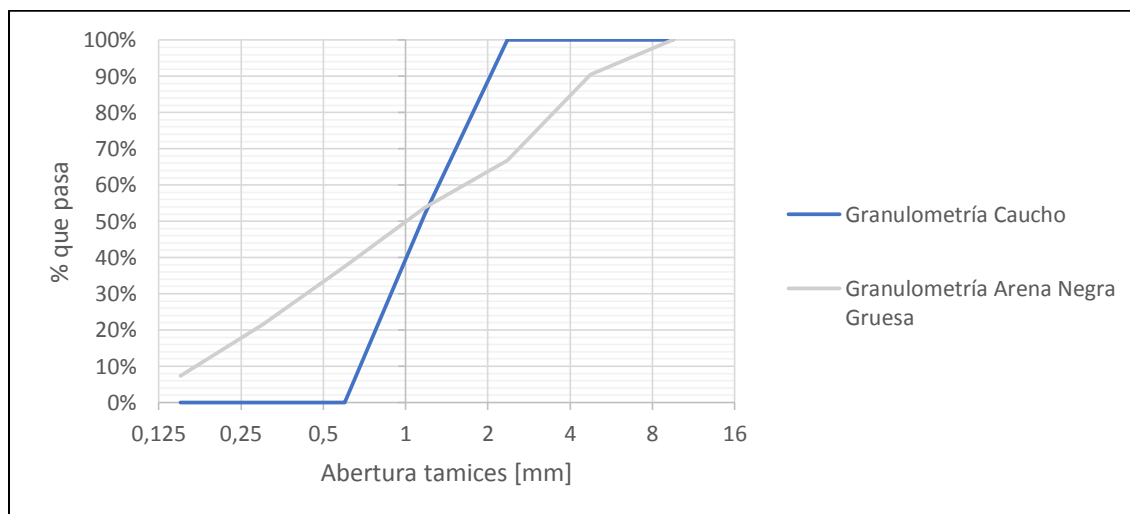


Ilustración 3.-Caucho proveniente recauchado de neumático fuera de uso.

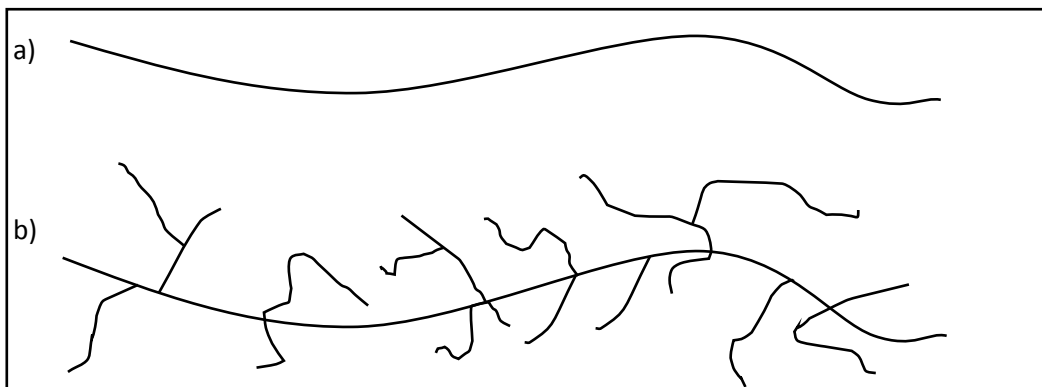


Polietileno

El polietileno es el plástico más utilizado en el mundo con una producción cerca de 80 millones de toneladas métricas al año. Su principal uso se aplica al embalaje como bolsas de supermercado, envoltorios y recipientes para alimentos, frascos de champú, los juguetes de los niños, etc. Por ser un material tan versátil, tiene una estructura muy simple, por lo que es más factible que los demás polímeros comerciales.

Una molécula del polietileno no es nada más que una cadena larga de átomos de carbono, con dos átomos de hidrógeno unidos a cada átomo de carbono (Etileno). A veces algunos de los carbonos, en lugar de tener hidrógenos unidos a ellos, tienen asociadas largas cadenas de polietileno. Esto se llama polietileno ramificado, o de baja densidad (PEBD). Cuando no hay ramificación, se llama polietileno lineal, o HDPE. El polietileno lineal es mucho más fuerte que el polietileno ramificado, sin embargo, este último es más barato y más fácil de fabricar.

Ilustración 4.-Estructura de cadena de Polietileno: a) Alta densidad. b) Baja densidad.



El etileno es una molécula bastante estable que se polimeriza en contacto sólo con los catalizadores. La conversión es altamente exotérmica (el proceso libera una gran cantidad de calor). Para la polimerización del etileno se utilizan cloruros u óxidos metálicos.

Este plástico se clasifica en varias categorías basadas sobre todo en su densidad y ramificación. Sus propiedades mecánicas dependen en gran medida de variables tales como la extensión y el tipo de ramificación, la estructura cristalina y el peso molecular.

Los Plásticos fueron suministrados por la línea de reciclaje de la empresa CAMBIASO HNOS SAC., la cual dispuso de dos formatos de polietilenos de alta y baja densidad.

Polietileno de alta densidad (PEAD)

El PEAD está posee una densidad mayor o igual a 0,94 g/cm³. El HDPE tiene un bajo grado de ramificación y por lo tanto fuertes fuerzas intermoleculares y resistencia a la tracción. El formato suministrado corresponde a un chipeado del material producto de la trituración mecánica de reciclaje de polietileno de alta densidad. Este posee una granulometría uniforme con un tamaño de grano que no supera los 2 centímetros y su forma es de tipo angular irregular. Su superficie es lisa y libre de suciedad y polvo, y su estructura es continua sin vacíos en su interior por ende no absorbe humedad. El polietileno de alta densidad se utiliza en productos y envases, tales como botellas de detergente, envases de margarina, contenedores de basura y tuberías de agua. Un tercio de todos los juguetes están fabricados en polietileno de alta densidad.

Tabla 13.-Propiedades físicas del plástico PEAD.

Propiedad Material	Polietileno de alta densidad (PEAD)
Densidad [gr/cm ³]	0,94-0,97
Temperatura de Fusión [°C]	130-140
Propiedad grano	Chipeado de PEAD
Superficie del grano	Lisa
Estructura interior	Compacta, cerrada.
Forma del grano	Cantos angulares
Color	Variados

Gráfico 5.-Granulometría chipecado de PEAD.

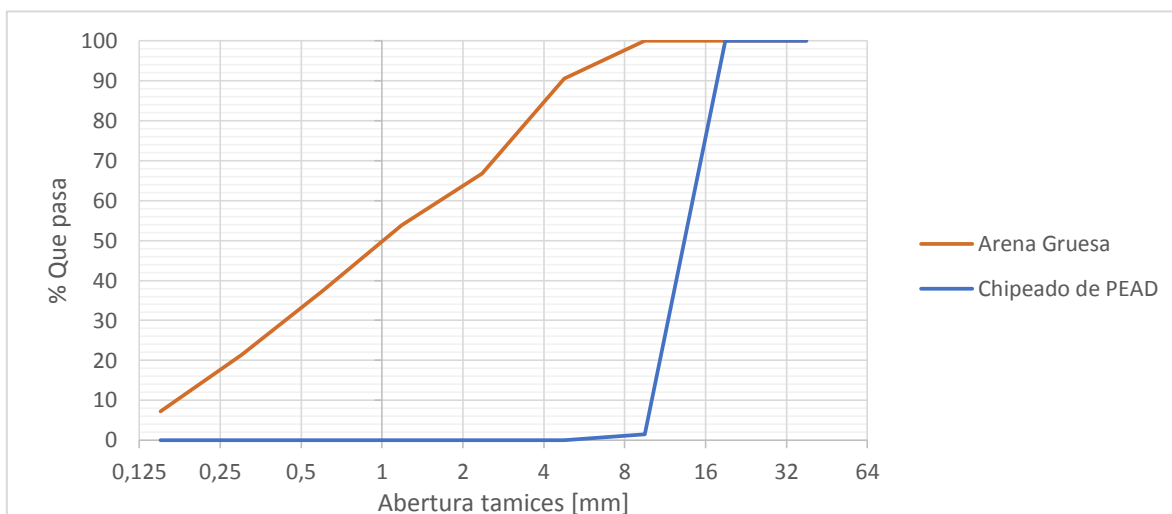


Ilustración 5.-Chipecado de Polietileno de alta densidad.



Fuente: plasticos-reciclados.es

Polietileno de baja densidad (PEBD)

El PEBD define su densidad dentro de un intervalo de $0,910\text{-}0,940\text{ g/cm}^3$. Este polímero tiene un alto grado de ramificaciones en su cadena polimérica, lo que significa que las cadenas no se empaquetan muy bien en la estructura cristalina. Por lo tanto, las fuerzas de atracción intermoleculares son menos fuertes, lo que se traduce en una menor resistencia a la tracción y un aumento en la ductilidad del material. Producto de su estructura de largas cadenas ramificadas adquiere una fluidez única cuando es fundido siendo ideal su extrusión y reutilización en nuevos productos. El LDPE se utiliza tanto para aplicaciones de envases rígidos y de películas de plástico tales como bolsas de plástico y películas para envolturas.

El formato suministrado es de tipo pellet de color gris, caracterizado por presentar una forma irregular en pliegues, además de ser poco compacto y con un alto grado de vacíos en su interior.

Tabla 14.-Propiedades del plástico PEBD (Pellet).

Propiedad Material	Polietileno de baja densidad (PEBD)
Densidad [gr/cm ³]	0,91-0,94
Temperatura de Fusión [°C]	105-115
Propiedad grano	Pelletizado de PEBD
Textura	Lisa y blanda
Estructura interior	Poroso, gran cantidad de vacíos.
Forma del grano	Cilíndrica plegados
Color	Gris

Gráfico 6.- Granulometría pelletizado de PEBD

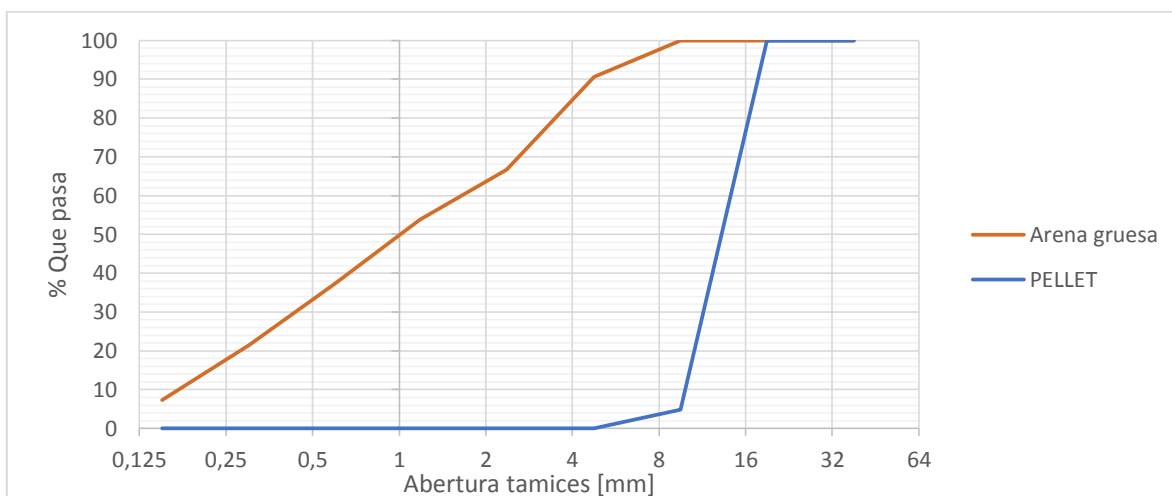


Ilustración 6.-Pelletizado de PEBD.



Aditivo Plastificante (Densidad 1,045 g/cm³)

Sika® Viscocrete® 5100 CL Reductor de agua de alta eficiencia: es un aditivo de alta capacidad de reducción de agua, basado en polímeros sintéticos que permite máxima fluidez, alta cohesión y mantener la trabajabilidad de la mezcla en forma prolongada.

4.6. Densidad real de los materiales

Con respecto a las densidades de los materiales, se realizaron pruebas a los áridos para determinar su densidad y así poder calcular el peso que se obtendrá del mortero cuando se reemplacen los residuos por arena. El porcentaje de sustitución será referido en volumen del agregado, lo que resultaría en un menor peso de la mezcla para un mismo volumen.

Tabla 15.-Densidad de los componentes utilizados en los morteros.

Material	Densidad Real [kg/m ³]
Cemento	3000
Arena	2700
Agua	1000
Plastificante	1050
Caucho	950
Plumilla	940
Pellets	960
Chips	970

4.7. Dosificaciones

La dosificación utilizada corresponde a la óptima entre trabajabilidad y resistencia que se requiere para desarrollar el estudio. Con esta proporción de los componentes se espera obtener un mortero de consistencia plástica y resistencia cercana a los 30 Mpa.

Tabla 16.-Dosificación Mortero Base.

Componente	[kg/m ³]
Cemento	450
Arena	1700
Agua	210
Relación A/C	0,46
Plastificante (0,5%)	2,3

La arena utilizada será la misma para todas las dosificaciones por lo que se mantendrá en un contenedor cerrado a la intemperie sin variar su humedad durante todo el tiempo de la etapa de elaboración de las mezclas. La dosificación utilizada para el mortero referencial no se verá alterada y a partir de esta se irá reemplazando la arena por distintos porcentajes en volumen de materiales reciclados especificados anteriormente. Sin embargo, será necesario variar la cantidad de aditivo plastificante a medida que se va aumentando el porcentaje de sustitución de manera que el mortero no pierda tanta trabajabilidad.

En la siguiente tabla, se detalla la composición de la dosificación para los diferentes tipos de morteros en los que se experimentará:

Tabla 17.-Dosificación para un m³ de tipo de mortero con adiciones de polímeros.

Mortero con Adición de fibras de caucho			
Componente	MCA10%	MCA30%	MCA50%
Cemento [kg/m³]	450	450	450
Arena [kg/m³]	1530	1190	850
Relación A/C	0,59	0,59	0,59
Plastificante [% peso del cemento]	0,36	0,45	0,56
Fibras de caucho [kg/m³]	60	179	300
Mortero con PEAD Polietileno de alta densidad (chips)			
Componente	MCH10%	MCH20%	MCH30%
Cemento [kg/m³]	450	450	450
Arena [kg/m³]	1530	1360	1190
Relación A/C	0,46	0,46	0,46
Plastificante [% peso del cemento]	0,27	0,32	0,36
Chips PEAD [kg/m³]	61	122	183
Mortero con PEBD Polietileno de Baja densidad (pellet)			
Componente	MPE10%	MPE20%	MPE30%
Cemento [kg/m³]	450	450	450
Arena [kg/m³]	1587	1360	1190
Relación A/C	0,46	0,46	0,46
Plastificante [% peso del cemento]	0,41	0,45	0,49
Pellets PEBD [kg/m³]	60	121	181

Atendido a que la arena posee un cierto porcentaje de humedad, se ha considerado necesario realizar una corrección con respecto a la cantidad de agua libre aportada por la arena, de manera que este factor no afecte a la dosificación, ni a la resistencia. Según las propiedades de la arena se ha determinado el % humedad del árido, además de su absorción y con esta información se ha calculado el porcentaje de aporte.

4.8. Elaboración de morteros experimentales

El hormigonado se realizó en las dependencias de Laboratorio de ensaye y control de obras de la Universidad (LEMCO), para su elaboración se utilizó una betonera de eje vertical con una capacidad máxima de 120 litros, en el caso de los morteros con agregados de polietileno.

Para los morteros con caucho se utilizó una maquina mezcladora normada. Los procedimientos a los cuales se adecuó este proceso son los contenidos y detallados en las normas NCh 1018 y NCh 158 respectivamente. Se verificó tanto la calidad de los materiales que componen los morteros experimentales como su correcta dosificación.

En la ejecución del hormigonado de la mezcla con adiciones de polietileno se procedió a pesar cada componente utilizando una balanza con precisión de 0,1 kilogramo para una dosis de 100 litros de mezcla. Luego de medir los materiales, se humedecieron los bordes de las betoneras y se adicionó el árido fino junto al 75% del total de agua. Tras un par de minutos de amasado, se agregó el cemento, el polietileno y el resto del agua. A medida que la mezcla lograba una homogenización adecuada se añadió el aditivo superplastificante regulando la cantidad hasta alcanzar la consistencia necesaria. Finalmente se vació la mitad de la mezcla en una carretilla para luego realizar el ensayo de docilidad según el método de asentamiento del cono de Abrams.

Para la elaboración del mortero con adiciones de caucho se utilizó una maquina amasadora de dos velocidades. En primer lugar, se introdujo los componentes para una dosis de 2 litro de mortero, previamente mezclados en el recipiente de acero y se inició un amasado durante 30 segundos; una vez homogenizados los materiales en seco se añade el agua gradualmente en conjunto con el aditivo superplastificante, sin dejar de mezclar. Luego de transcurrido el tiempo de 2 minutos se detuvo la máquina para completar el proceso con una amasado manual para asegurar que la mezcla no se depositase en las paredes o en el fondo del recipiente alterando la muestra.

Ilustración 7.-Máquinas utilizadas para elaboración de las mezclas de mortero.



4.9. Elaboración de las Probetas

Para los moldes cilíndricos de dimensiones 150x300 mm se realizó el llenado en dos cargas, la primera hasta la mitad del molde, luego se vibró. De la misma forma se llenaba el resto del molde y se volvió a vibrar por última vez para asegurar el correcto llenado de toda la probeta y la eliminación de las burbujas de aire existentes. Una vez llenas las probetas, se procedió a enrasar y nivelar la superficie.

Los moldes prismáticos de dimensiones 40x40x160mm, se hormigonan y vibran de acuerdo con la normativa NCh2260, vertiendo el mortero en los moldes de acero igualmente normalizados, comenzando la compactación de la mezcla mediante la mesa vibradora dispuesta por el LEMCO. Finalmente, se procedió al nivelado y enrasado de la superficie.

4.10. Desmolde de las probetas

Las probetas fueron desmoldadas una vez transcurridas 24 horas desde el hormigonado de los cilindros. En el caso de las probetas prismáticas se aumentó el período de espera a 48 horas, para así asegurar un desmolde que no causara daño en las probetas.

4.11. Curado

El curado de las probetas se realiza en una cámara de humedad que se encuentra en LEMCO, la cual mantiene niveles de temperatura y humedad controlada. Transcurridos los 28 días, necesarios para que el mortero alcance la mayor de sus resistencias, se retiraron de la cámara de humedad para luego ser rectificadas cual sea el caso y posteriormente ensayadas a compresión.

Ilustración 8.-Elaboración mezcla de morteros experimentales



Ilustración 9.-Preparación probetas Rilem para ensayos de esfuerzos.



4.12. Ensayos de caracterización para morteros estudiados

4.12.1. Ensayo de consistencia: Método cono de Abrams

Una vez finalizado el proceso de amasado para las mezclas de 100 litros, se procedió inmediatamente a la realización del ensayo de consistencia del hormigón fresco por el método del cono de Abrams, según la norma NCH-1019.

Para los morteros con adiciones de polietileno la docilidad se estableció un asentamiento de cono mayor a 6 cm, por lo que no se requiere aumentar la relación agua cemento, manteniendo la relación de la dosificación base inicial. Cabe destacar que solo se varió el aditivo plastificante manteniendo la cantidad de agua, para así no afectar la resistencia del mortero una vez endurecido.

Ilustración 10.-Asentamiento de cono de Abrams para morteros con agregados de PEAD y PEBD.



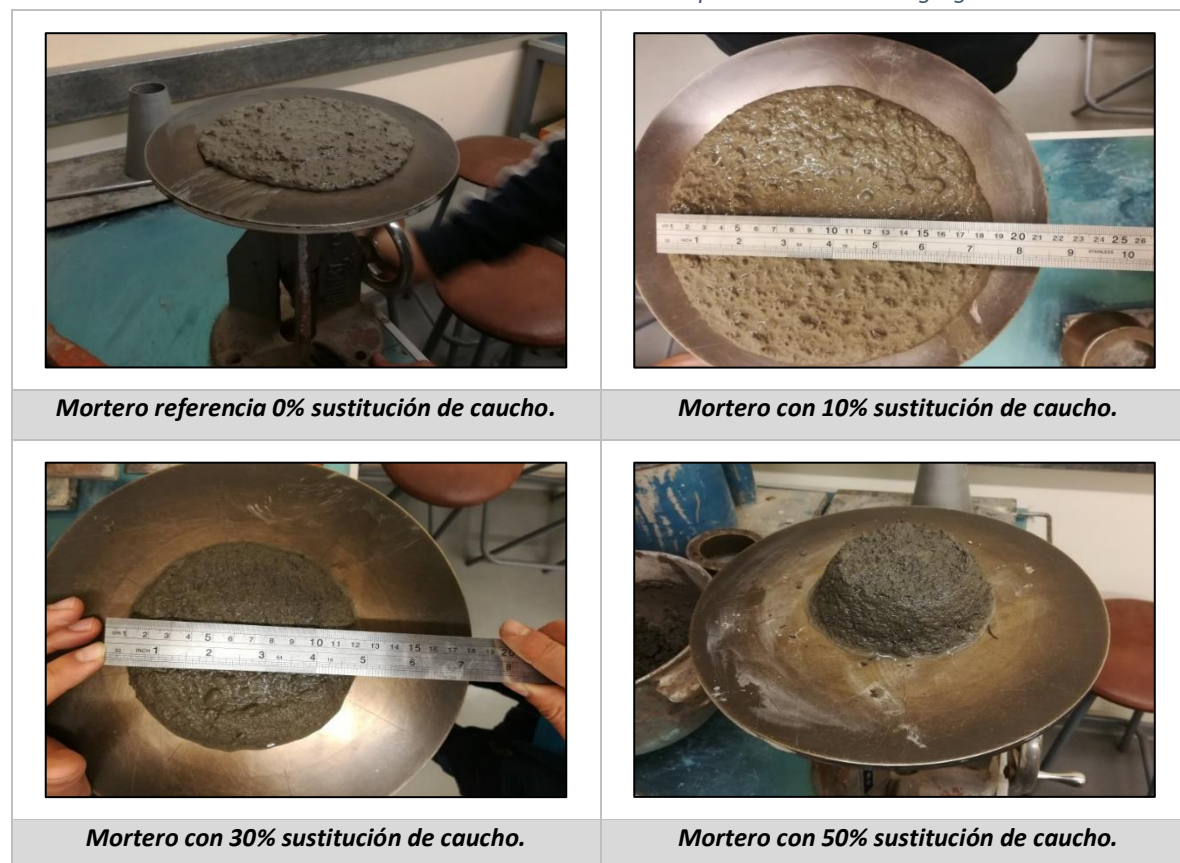
4.12.2. Ensayo de consistencia: Método de escurrimiento mesa de sacudida

Para el mortero con caucho se establece un escurrimiento mayor a 150 mm, al no tener resultados en un principio con la relación agua cemento establecida de 0.46, se optó por aumentar la cantidad de agua y agregar aditivo plastificante para así poder obtener una mezcla de mortero de consistencia más fluida.

El proceso de vibrado fue dificultoso cuando se trabajó con el mortero de 50% en reemplazo de caucho por arena, se tuvo un extremo cuidado con el tiempo de vibrado de modo que el mortero no exudara o se segregara el material por exceso de vibrado.

En la siguiente ilustración (11) se observan los distintos tipos de escurrimientos según sus porcentajes de sustitución de fibras de caucho. Además se ve reflejado el uso del aditivo superplastificante en las mezclas que no poseen sustitución de caucho, alcanzado un escurrimiento de hasta 210 [mm]. A mayor porcentaje de sustitución las mezclas pierden docilidad y cada vez son menos fluidas.

Ilustración 11.-Método de escurrimiento mesa de sacudida para morteros con agregados de caucho.



4.12.3. Ensayo a compresión

Probetas Cilíndricas 150x300 mm

Previo al ensayo de compresión fue necesario realizar ciertos procedimientos previos, tales como el registro de peso y dimensiones de las probetas cilíndricas. Posteriormente se ejecutó un rectificado según lo indicado en la norma NCh 1172, que regula la planeidad requerida de las caras de las probetas en contacto con la máquina de ensayo a compresión.

El ensayo requiere que la placa de carga se encuentre limpia y libre de restos de hormigón, además las caras de las probetas deben posicionarse en los márgenes definidos en la placa de carga. El equipo Controls C35Z00 posee un rango de carga de 3000 [kN].

Las probetas se ubicaron en la prensa ajustando la cara superior al máximo, luego se comienza a aplicar la carga de manera progresiva hasta lograr una velocidad de carga constante y adecuada a los objetivos del ensaye. Se registró la carga máxima alcanzada antes que se produzca la rotura tras realizar los ajustes correspondientes- Esta carga será la resistencia a compresión simple del hormigón.

Ilustración 12.-Equipos utilizados para ensayo a compresión de probetas cilíndricas.

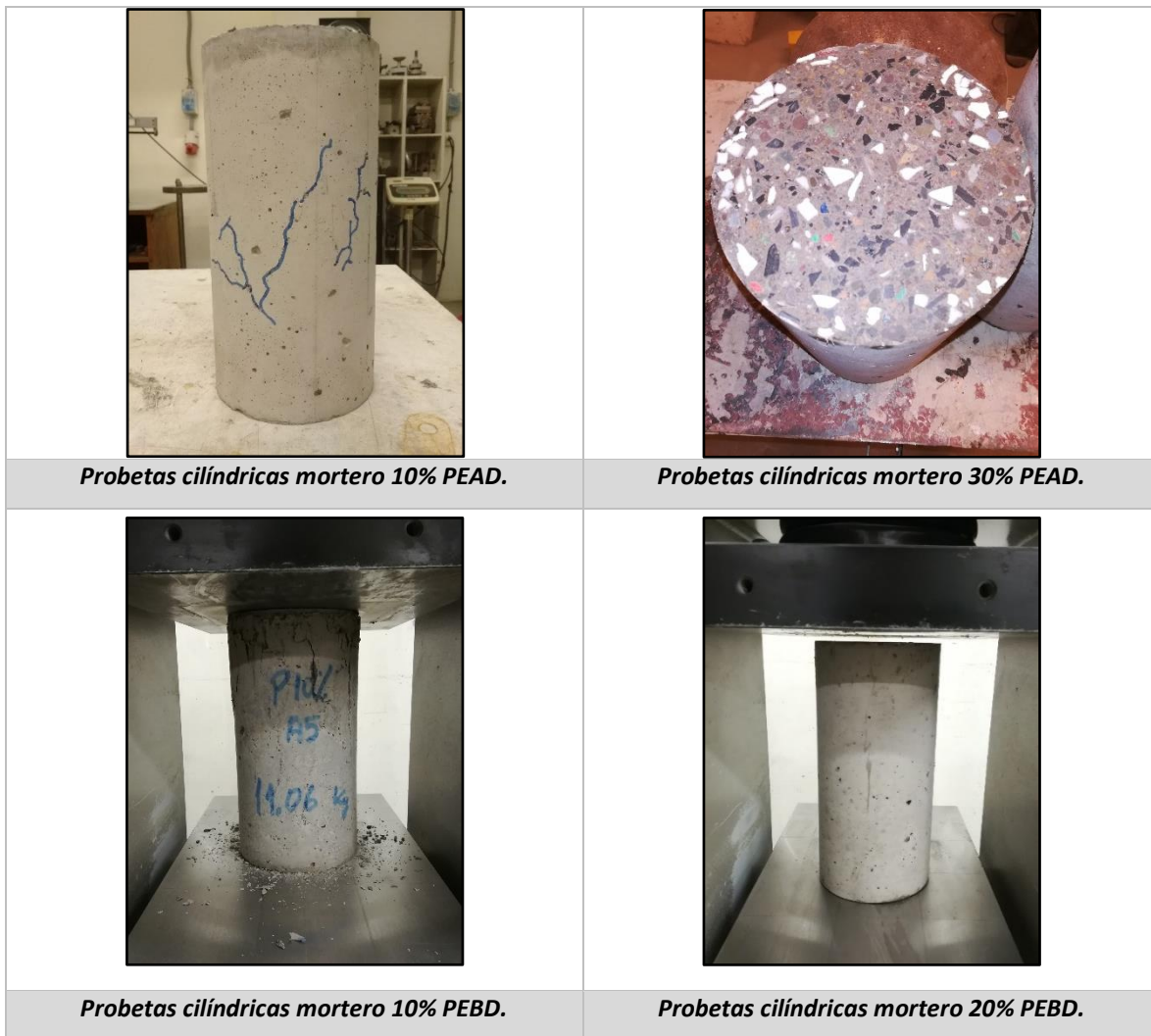


Maquina rectificadora HI-KENMA.



Equipo Controls C35Z00 para ensayo de compresión.

Ilustración 13.-Probetas cilíndricas de morteros con agregados de PEAD y PEBD.



Probetas Prismáticas 40x40x160 mm

Las mitades obtenidas del ensayo de flexo tracción fueron utilizadas para ser ensayadas bajo esfuerzos de compresión. Se utilizó una prensa Soil test, inc. Modelo Versa-tester con rango de carga 3000 [kN].

Se puso las mitades de probetas en la prensa ajustándolas a las placas de carga con sección de 40x40 mm, aplicando el esfuerzo de compresión a las caras laterales de manera de no apoyar la cara de llenado para que el ensayo sea válido, tal como se muestra en la imagen **XX**. La velocidad de carga se mantiene constante hasta lograr la ruptura de la probeta, registrando luego la carga alcanzada expresada en kilogramos.

Ilustración 14.-Equipos utilizados para ensayo a compresión de probetas prismáticas.



Ilustración 15.-Probetas prismáticas de mortero con agregado de caucho ensayadas a compresión.



5. Resultados y Análisis de los datos

5.1. Docilidad Morteros estudiados

Ensayo Asentamiento cono de Abrams

Se obtuvieron diferentes consistencias según las características propias de cada material sustituido, tales como su superficie de contacto con la pasta de cemento y el grado de absorción de agua que puede llegar a alcanzar el grano. Se observó que el uso del aditivo superplastificante no influyó determinadamente en los resultados para todos los materiales utilizados.

A continuación, se analizó los resultados y las posibles causas de la pérdida de docilidad en ciertos morteros con agregados poliméricos.

Polietileno de alta densidad

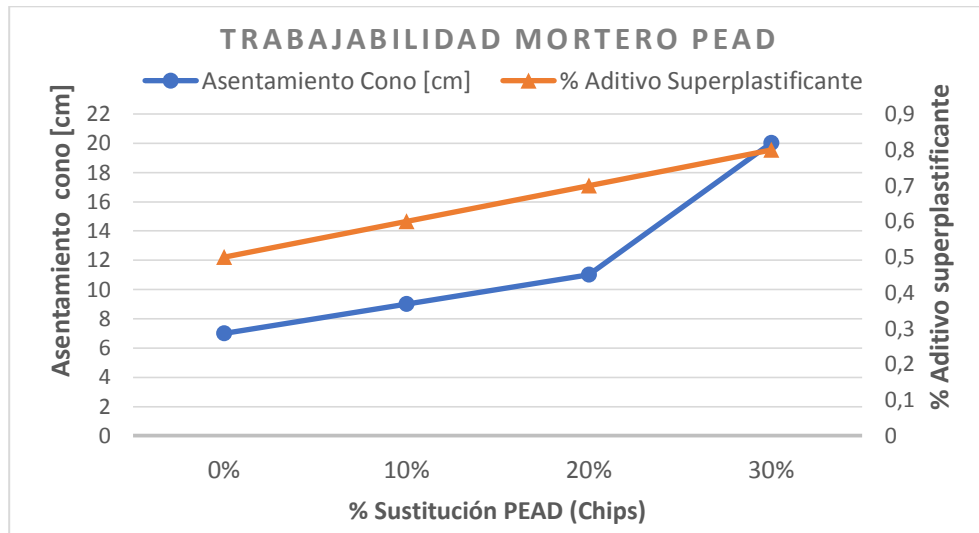
Para la mezcla de mortero con PEAD en formato de “chips” se obtuvo una consistencia plástica con los siguientes asentamientos:

Tabla 18.-Resultados asentamiento de cono para morteros con adición de PEAD.

Plástico reciclado: PEAD (chips)				
Sustitución de agregado	0%	10%	20%	30%
Asentamiento Cono [cm]	7	9	11	20
Aditivo Superplastificante (% peso del cemento)	0,5	0,6	0,7	0,8

A medida que se aumenta el porcentaje del aditivo superplastificante aumenta directamente la docilidad del mortero con agregado de PEAD, generando un nivel de asentamiento mayor cuando se aplica un 0,8 % de aditivo superplastificante en porcentaje de sustitución del 30% del material en la mezcla. Se pudo observar que el PEAD en formato de “chips” presenta un grano de estructura uniforme de superficie es lisa y no absorbe humedad, por lo que no altera la cantidad de agua presente en la mezcla. Al analizar el Gráfico 10, se observa una tendencia en cuanto a utilización del aditivo y el asentamiento de la mezcla de mortero. En general, el mortero en se efectuó sustitución con con PEAD, se comportó dócil y sin segregación.

Gráfico 7.-Docilidad mortero con adiciones de PEAD.



Polietileno de baja densidad

Por el contrario, al ensayar con muestras en que sustituyó con polietileno de baja densidad se observa que presenta algunas complicaciones con respecto a la docilidad. Los resultados observados reflejan que las mezclas obtenidas presentan poca consistencia debido a las características propias del material utilizado.

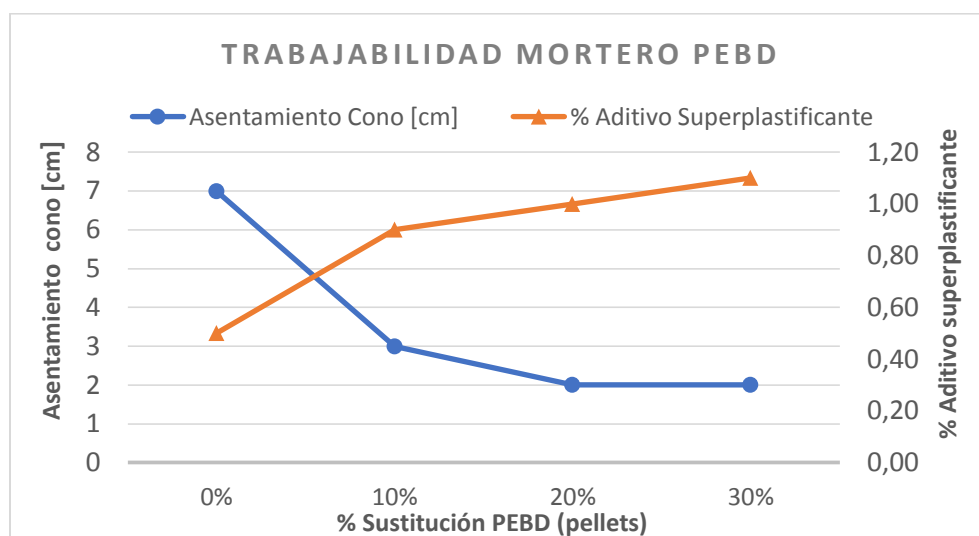
Tabla 19.-Resultados asentamiento de cono para morteros con adición de PEBD.

Plástico reciclado: PEBD (pellets)				
Sustitución de agregado	0%	10%	20%	30%
Asentamiento Cono [cm]	7	3	2	2
Aditivo Superplastificante (% peso del cemento)	0,5	0,9	1,0	1,1

El aditivo plastificante en este caso no influyó de manera positiva en la mezcla de mortero manteniendo la docilidad sin sufrir muchos cambios. Se alcanzó hasta un 1,1 % del aditivo a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución del agregado liviano, aun así, no fue suficiente para lograr la consistencia establecida.

Se puede observar en el Gráfico 8 un decrecimiento en la trabajabilidad del mortero con PEBD, lo que indica que este material es poco dócil y cohesivo para mezclarlo con un mortero de cemento. La pérdida de docilidad observada se puede atribuir a la forma del grano de PEBD, que al presentar una superficie irregular, una gran cantidad de pliegues y además poseer un alto grado de vacíos es plenamente consistente el deducir que el grano retuvo agua en su interior afectando la mezcla resultante.

Gráfico 8.-Docilidad mortero con adiciones de PEBD.



Ensayo Método de escurrimiento mesa de sacudida

Caucho reciclado

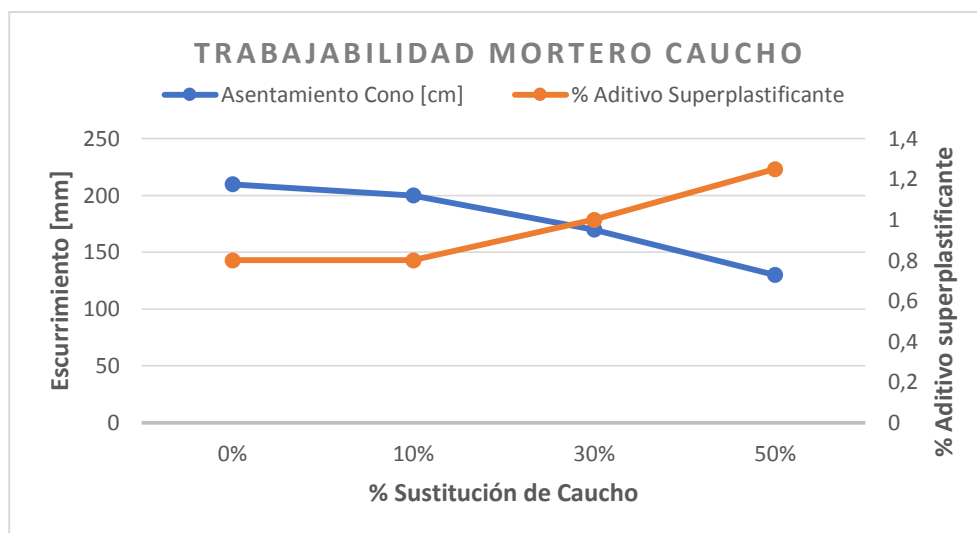
La utilización de caucho como sustituto de agregado fino (arena) redujo la docilidad del mortero en comparación con el mortero referencial observando complicaciones al momento moldear las mezclas para las probetas, mostrando dificultad en el proceso de vibrado.

Tabla 20.-Resultados escurrimiento para morteros con adición de caucho.

Fibras de Caucho Reciclado				
Sustitución de agregado	0%	10%	30%	50%
Valor de escurrimiento [mm]	210	200	170	130
Aditivo Superplastificante (% peso Cemento)	0,8	0,8	1,0	1,25

Se aprecia una disminución del escurrimiento a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución del caucho. El aumento en el uso del aditivo alcanzando 1,25%, con respecto a la dosis de cemento, tuvo un bajo desempeño sin mayores resultados dando un escurrimiento de tan solo 130 milímetros de diámetro en la mesa de sacudida, perdiendo docilidad con respecto a mortero referencial. En consecuencia se estima que es recomendable utilizar un porcentaje no superior a un 1% de aditivo superplastificante, ya que, este no aporta mayor trabajabilidad al mortero a medida el reemplazo de arena, siendo el mortero con 30% de sustitución de caucho el mortero con una docilidad aceptable.

Gráfico 9.-Docilidad del mortero con adiciones de caucho.



5.2. Densidad de los Morteros estudiados

Se analizaron las 35 probetas cilíndricas y 20 probetas prismáticas de morteros elaborados con agregados poliméricos reciclados, registrando la masa y el volumen para luego calcular la densidad real del mortero.

Polietileno de alta densidad

Para el caso del polietileno de alta densidad, el peso del mortero experimental registra una disminución con respecto al mortero de referencia. A medida que aumenta el porcentaje de sustitución el mortero se vuelve ligeramente más liviano, debido a que la densidad que presenta el grano de PEAD es mucho menor con respecto a la arena.

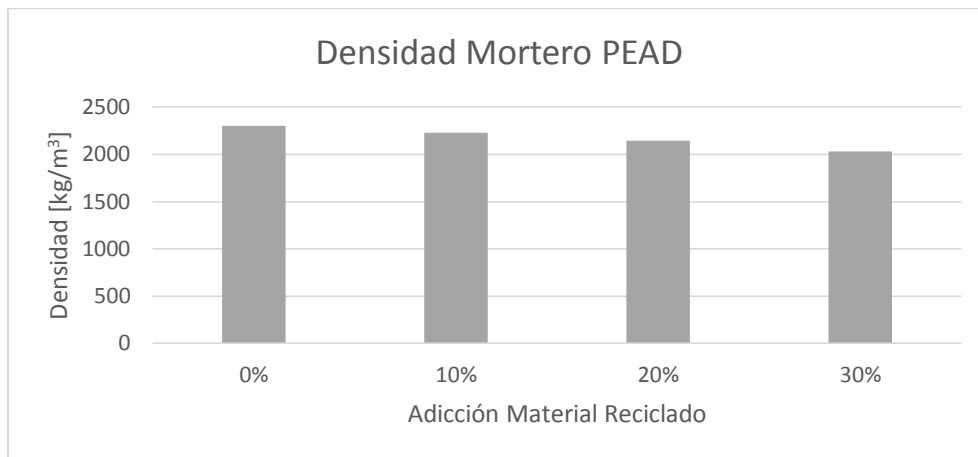
Tabla 21.-Resultados densidad morteros PEAD.

Plástico reciclado: PEAD				
Sustitución de agregado	0%	10%	20%	30%
Coefficiente Variación (%)	0,47	2,56	2,38	2,34
Densidad Promedio [kg/m ³]	2.303	2.231	2.144	2.033
% Variación de densidad c/ MR	-	3	7	12

Según el coeficiente de variación, las probetas con agregado de PEAD variaron entre un 2% y un 3% con respecto al valor medio de densidad, por lo cual se toma como dato el promedio de las muestras para hacer más representativo el análisis.

El mortero con mayor porcentaje de sustitución fue el que alcanzó una menor densidad, reduciendo un 12% con respecto al mortero de referencia y promediando una densidad aproximada de 2000 [kg/m³]. Puesto que este material no presento dificultades en la trabajabilidad del mortero se puede seguir agregando un porcentaje mayor de sustitución y disminuir aún más el peso del mortero para que logre las densidades de un hormigón ligero.

Gráfico 10.-Densidad mortero con agregado de PEAD reciclado.



Polietileno de baja densidad

Respecto al mortero con agregado de PEBD su densidad disminuye notablemente, dado que la densidad de este material es menor que los demás materiales experimentales. Se obtiene morteros con menor peso que los anteriores, esto se debe a que el grano del pellet posee una mayor cantidad de vacíos en su interior lo que se traduce con un alto porcentaje de aire atrapado.

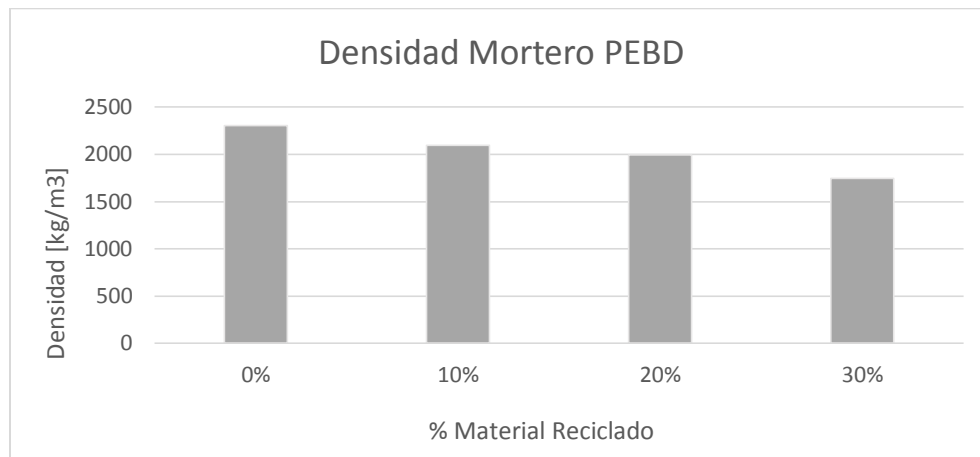
Tabla 22.-Resultados densidad morteros PEBD.

Plástico reciclado: PEBD				
Sustitución de agregado	0%	10%	20%	30%
Coefficiente Variación (%)	0,47	2,33	1,55	1,92
Densidad Promedio [kg/m³]	2.303	2.098	1.994	1.720
% Variación de densidad c/ MR	-	9	13	25

El coeficiente de variación no fue mayor a un 2%, por lo que se obtiene de las muestras un dato representativo del promedio de la densidad de las probetas con agregado de PEBD.

Con la sustitución de un 10% de este plástico en la mezcla basta para igualar la densidad del mortero con 30% de PEAD, creando un mortero mucho más liviano que el anterior. Al alcanzar el 30% de sustitución el mortero alcanzar una densidad de 1700 kg/m³, reduciendo un 25% del peso con respecto a un mortero convencional.

Gráfico 11.-Densidad mortero con agregado de PEBD reciclado.



Caucho reciclado

Por último, para analizar las propiedades físicas del mortero con adiciones de fibras caucho, se pesaron las probetas prismáticas con sus respectivas dosificaciones llegando obtener resultados significativos respecto a la densidad de este. Cabe destacar que la densidad real del caucho es menor que la arena gruesa, por lo que se esperaba una disminución en cuanto al peso de mortero que se fabricó.

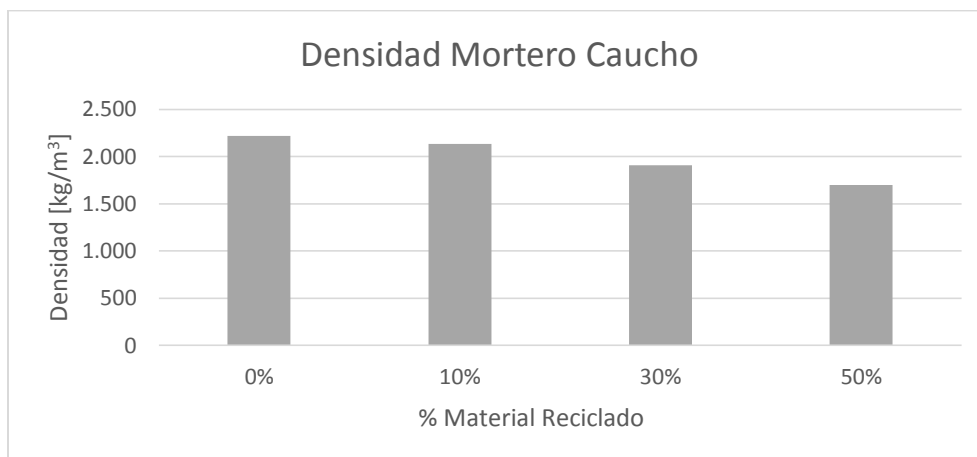
Tabla 23.-Resultados densidad morteros Caucho.

Caucho reciclado				
Sustitución de agregado	0%	10%	30%	50%
Coeficiente Variación (%)	1,84	2,55	1,90	0,71
Densidad Promedio [kg/m³]	2.228	2.133	1.910	1.700
% Variación de densidad c/ MR	0	4	14	24

El coeficiente de variación indica que las muestras fueron representativas para los morteros sustitución de caucho, sin embargo, el mortero con 10% de sustitución aumento su variación respecto al valor medio de las probetas debido posible irregularidad en la distribución de las fibras caucho dentro de la mezcla o bien una falta de mezclado en el proceso de elaboración del mortero.

Al igual que el plástico PEBD, el caucho disminuye el peso del mortero alcanzando densidades de los 1700 kg/m³ cuando se sustituye un 50% del material y disminuyendo en un 24% la densidad con respecto al mortero de referencia.

Gráfico 12.-Densidad mortero con agregado de Caucho Reciclado.



Hay cierta tendencia en los datos que describe una disminución de la densidad del mortero con los distintos tipos de materiales reciclados a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución y se debe principalmente a que la densidad real que poseen estos materiales es menor que la densidad de la arena.

5.3. Resistencia a compresión Morteros estudiados

Polietileno de alta densidad

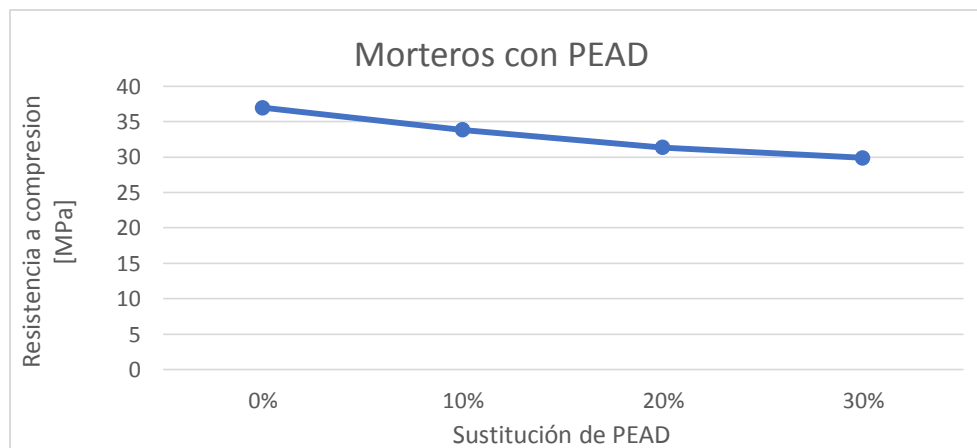
El coeficiente de variación calculado a partir de los datos entregados mediante el ensayo a compresión muestra una aceptabilidad para la serie de probetas de mortero con adiciones de PEAD, para lo cual los resultados fueron promediados obteniendo un valor de resistencia representativo para las muestras.

Dados los resultados, se puede observar que hubo una disminución en la resistencia a compresión de este mortero con HDPE reciclado con respecto al mortero referencial, disminuyendo aproximadamente un 20% de la resistencia para el mayor porcentaje de sustitución de este plástico. Por lo tanto, se observa que a mayor porcentaje de sustitución de plástico la resistencia a compresión disminuye directamente. Se puede apreciar que los chips de PEAD lograron un mayor desempeño en cuanto a la resistencia del mortero, producto de la forma del grano y su superficie, además de ser más compacto en su composición que el PEBD (pellets).

Tabla 24.-Resultados de resistencia a compresión mortero con adiciones de PEAD.

PEAD	0%	10%	20%	30%
Promedio R_f [MPa]	37,2	33,8	31,3	29,9
Desviación Standard	0,63	0,38	0,56	0,65
Coeficiente Variación (%)	1,7	1,1	1,8	2,1
% Variación respecto al MR	-	9,0	15,7	19,6

Gráfico 13.-Resistencia a Compresión mortero con adiciones de PEAD.



Polietileno de baja densidad

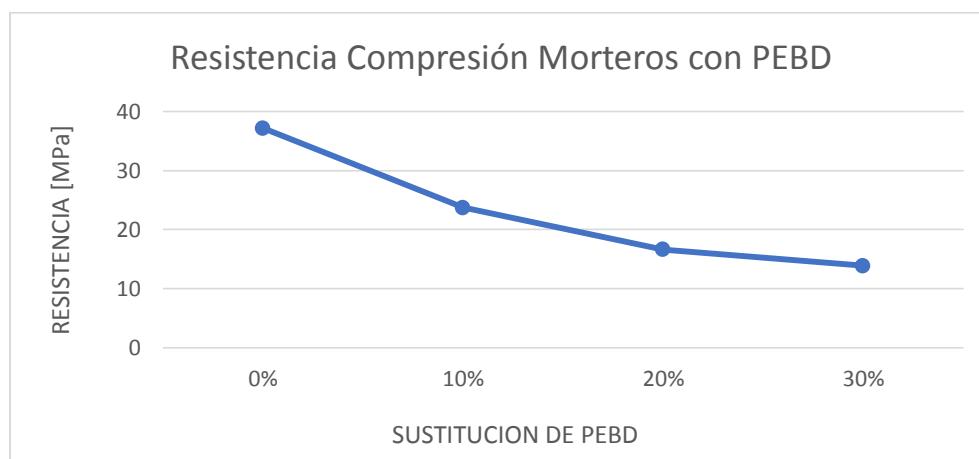
Los resultados de las probetas fueron promediados para obtener la media del valor de la resistencia a compresión, puesto que el coeficiente de variación no fue mayor a 2% en el caso de mortero con sustitución de 10% de PEBD. Sin embargo, cuando se trabajó con los morteros de 20% y 30% de sustitución del agregado, se observa que el coeficiente de variación aumento desviando 5,5% y 3,9% del valor medio de las probetas respectivamente. Esto significa que a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución la mezcla fue más difícil de trabajar llevando a variaciones en los procesos de hormigonado y ensaye.

Se observa una mayor disminución en la resistencia con respecto a los resultados obtenidos de los morteros con PEAD, resistiendo hasta un 50% menos que el mortero de referencia con solo sustituir un 10% del material, observando una notoria caída en la curva. Se analiza que el PEBD en formato de pellet, no aporta al mortero propiedades mecánicas para resistir esfuerzos de compresión, debido a la textura flexible y con vacíos de aire que posee el material, generando una falla más dúctil en las probetas.

Tabla 25.- Resistencia promedio de morteros con adiciones de PEBD reciclado.

PEBD	0%	10%	20%	30%
Promedio R_f [MPa]	37,2	18,2	16,6	13,9
Desviación Standard	0,63	0,40	0,93	0,55
Coeficiente Variación (%)	1,7	1,7	5,5	3,9
% Variación respecto al MR	-	51,1	55,2	62,6

Gráfico 14.-Resistencia a Compresión mortero con agregado de PEBD.



Caucho reciclado

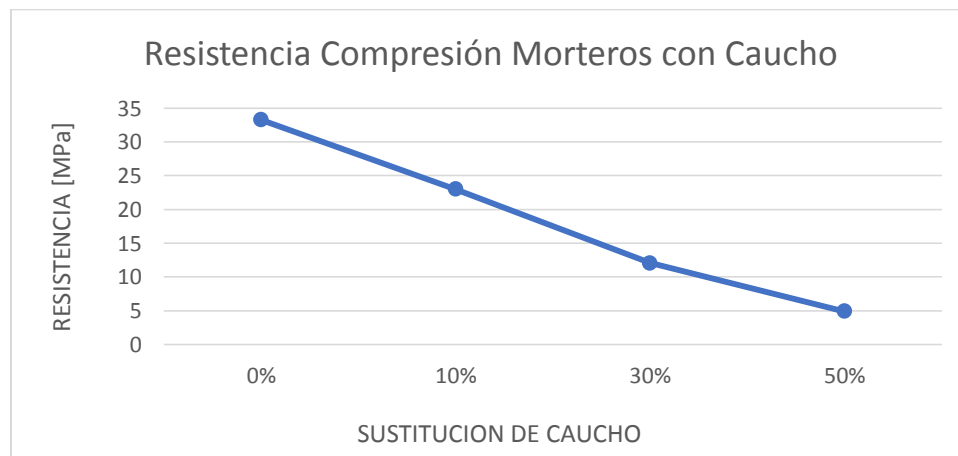
Los resultados de las piezas ensayadas fueron promediados para obtener la media del valor de la resistencia. Se muestran el promedio y desviación de las resistencias para cada porcentaje de sustitución. Cabe destacar que las probetas de mortero con 50% de sustitución de caucho variaron con respecto a la resistencia promedio calculada, lo que se atribuye que este tipo de mortero presentaba una dificultad al momento de vibrar la mezcla en los moldes, por lo que se deduce que las probetas pueden que hayan sufrido un exceso de vibrado o segregación en sus componentes, lo que difiere en la representatividad de los datos.

Se observa una disminución en notable en la resistencia con respecto al mortero de referencia, resistiendo 30% menos en el caso de los morteros con 10% de sustitución y perdiendo hasta 85% de resistencia los morteros con 50% de adición de caucho.

Tabla 26.-Resultados de resistencia a compresión mortero con adiciones de fibras de caucho reciclado.

Caucho	0%	10%	30%	50%
Promedio R_f [MPa]	33,3	23,0	12,1	4,9
Desviación Standard	0,64	0,49	0,33	0,34
Coefficiente Variación (%)	1,9	2,1	2,7	6,9
% Variación respecto al MR	-	30,8	63,7	85,3

Gráfico 15.- Resistencia a Compresión mortero con agregado de Caucho Reciclado.



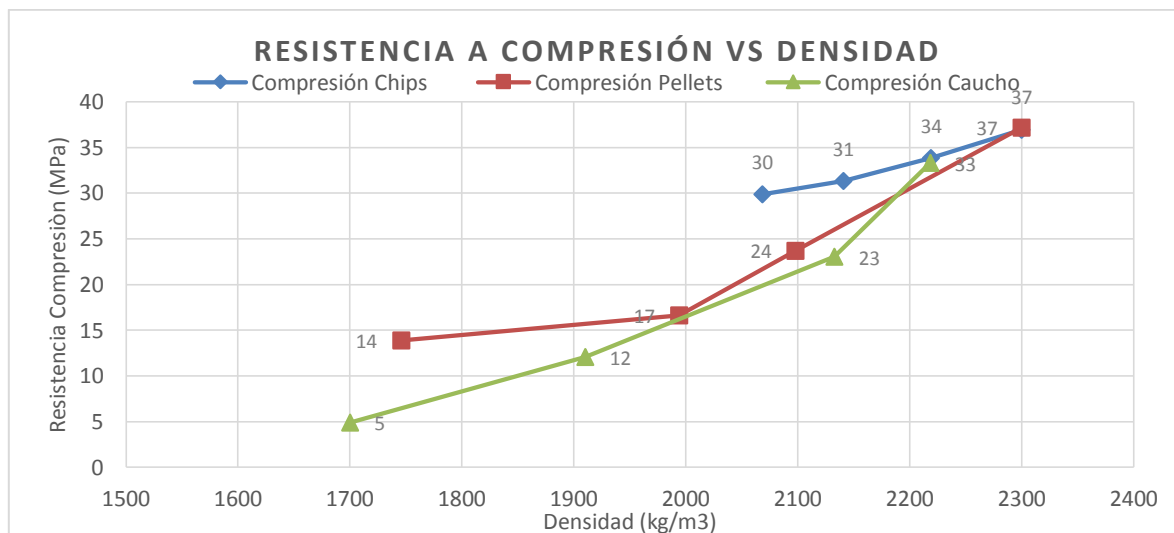
La relación entre la resistencia a la compresión y la densidad de los morteros estudiados presenta una tendencia positiva, a medida que aumenta la densidad de los morteros aumenta también la resistencia a compresión hasta alcanzar los valores de referencia del mortero corriente, sin adiciones. Por tanto, los morteros con densidades menores a 2000 [kg/m³] no logran resistir esfuerzos a compresión mayores a 20 megapascuales.

La línea de tendencia de mortero con agregados de PEAD fue más lineal que los demás morteros, esto se debe a que el chip de PEAD fue el material que mejor se comportó en cuanto resistencia del mortero, sin embargo, no redujo su densidad a más de 2000 [kg/m³]. La tendencia permite reduciendo la densidad del mortero perdiendo proporcionalmente resistencia a medida que se aumente el porcentaje de sustitución de plástico.

Por otro lado, los morteros con agregados de PEBD marcaron mal desempeño del grano tipo pellet suministrado, el cual redujo la resistencia a compresión del mortero y no se puede seguir reduciendo peso sin perder más de un 80% de resistencia respecto a un mortero convencional. Esto se atribuye a que el grano no era apropiado para entregar propiedades mecánicas al mortero en cuanto a resistir esfuerzos de compresión, pero si poseía grandes ventajas en peso siendo uno de los morteros con menor densidad (1700 [kg/m³]).

En el caso del mortero con fibras de caucho, su tendencia marca una relación lineal entre las variables consideradas, sin embargo no es posible aumentar más de un 50% de sustitución de arena por fibras, producto que el mortero no resistiría más de 5 [Mpa] a esfuerzos de compresión.

Gráfico 16.-Resistencia a compresión v/s Densidad



6. Conclusiones

Al comparar las propiedades físicas y mecánicas del mortero experimental con uno convencional, se concluye que existe una reducción en cuanto a la densidad y peso a medida que el porcentaje de sustitución aumentaba, debido al bajo peso que presentan gránulos de polietileno y la fibra de caucho proporcionaron ligereza a la mezcla de mortero. Sin embargo, producto de esta disminución de la densidad de los morteros se ve afectada directamente su resistencia a cargas de compresión bajando de manera notable. Esto se atribuye a que los materiales incorporados al mortero poseen una resistencia propia más baja que un agregado convencional, por lo que no aporta sobre resistencia del mortero.

Trabajabilidad

La trabajabilidad de los morteros se ve afectada cuando se utiliza las fibras de caucho y los pellets de PEBD, esta propiedad va disminuyendo mientras mayor es la sustitución del agregado. Por un lado, el mayor porcentaje de sustitución de arena por fibras de caucho reduce el escurrimiento del mortero hasta en un 38% con respecto al mortero de referencia, bajando de los 210 a 130 milímetros de escurrimiento en la mesa de sacudida.

De manera similar, los morteros con adiciones de gránulos PEBD (Pellet) pierden docilidad cuando mayor es la cantidad sustituida, siendo estos hasta un 70% menos trabajable. Con este material se obtuvo el mortero con menor docilidad, dada la forma de los granos presenta pliegues en donde la pasta de mortero abarcó la totalidad de la superficie del grano, deduciendo así, un exceso de agua atrapada entre los pliegues irregulares y en el interior gránulos de plástico utilizado.

Contrariamente el mortero con adiciones de PEAD (Chipeado) adquirió una mayor trabajabilidad bajando 13 centímetros en el asentamiento del cono Abrams, con respecto al mortero de referencia (7 centímetros), para un 30% de sustitución de plástico. Este material presentó una buena trabajabilidad gracias al aumento del porcentaje de aditivo superplastificante y a la estructura compactada de los granos de PEAD.

Densidad

Como era de esperar, la densidad de los morteros elaborados disminuyó a medida que la sustitución de los agregados poliméricos aumentaba. Los tres materiales utilizados poseen una densidad entre los 0.93 a 1.00 gramos por centímetro cúbico y al incorporarlos al mortero lo hacen más ligero.

El mortero con fibra de caucho al establecer un mayor porcentaje de sustitución (50%) fue uno de los compuestos más liviano variando la densidad del mortero en un 23.7% con respecto al mortero sin adiciones alcanzando una densidad de 1700 kilogramos por metro cúbico.

En el caso de los morteros con adiciones de polietilenos, fue el PEBD el que logró una mezcla de mortero más liviano, reduciendo un 25,31% para un 30% de sustitución. Por otro lado, el mortero con PEAD solo redujo un 11,7% su densidad con respecto al mortero de referencia. Si bien, los dos materiales bajaron la densidad del mortero, solo el mayor porcentaje de sustitución de PEBD logró una densidad de los 1720 kilogramos por metro cubico de mezcla.

Resistencia a la compresión

Luego de analizar los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión por parte de los tres materiales, se llega a la conclusión que existe una tendencia de disminución de la resistencia cada vez que los morteros se hacen más ligeros. Esto se debe a que a la rigidez y resistencia propia de los agregados poliméricos es menor a la del mortero, se deduce que existe primero una fatiga del agregado antes que la del mortero, apreciando una falla dúctil en las probetas.

El material que mejores resultados obtuvo fue el chipeado de PEAD, la resistencia a compresión del mortero con este agregado disminuyó con respecto al de referencia en un 9%,15% y 19% para los porcentajes de sustitución de 10%,20% y 30%. La resistencia del mortero con 30% de reemplazo fue de 29,9 MPa, postulando este mortero como el más ligero (2000 kilogramos por metro cúbico) y mejor resistencia a la compresión.

Los Pellets de PEBD, debido a su poca rigidez y la cantidad de vacíos de los granos, no contribuyen a la resistencia del mortero. Para los morteros con un 10% de sustitución del agregado hubo una disminución de mitad de la resistencia. Sin embargo, las resistencias se mantuvieron entre 18 y 13 MPa.

Para el caso de morteros con agregados fibras de caucho, se varió con respecto al referencial de un 30% hasta un 85% la resistencia a compresión. El caucho no aporta propiedades mecánicas al mortero cuando se utiliza como una fracción del agregado, es por lo que hay una notoria disminución de la resistencia comparadas a un hormigón pobre. Para un porcentaje de reemplazo de 50% de fibras, la resistencia fue de 4,9 MPa.

Los agregados de plásticos de polietileno y las fibras de caucho resultan factibles para reemplazar los agregados convencionales. Al introducir agregados poliméricos reciclados a la mezcla de mortero, no contribuyen con la resistencia a compresión, por el contrario, esta decrece, pero si

se trata de elementos constructivos que requieran soportar cargas ligeras, se vuelven una alternativa más que atractiva para la utilización de plásticos y caucho reciclado, encontrando así una valoración para los residuos.

Usos y Aplicaciones para morteros aligerados con agregados poliméricos.

- Mobiliario urbano (Bancas, mesas, maseteros).
- Pavimentos de bajo tránsito (aceras, ciclovías, paseos peatonales).
- Baldosas para tránsito peatonal
- Solerillas, bloques, paneles y elementos prefabricados no estructurales.
- Revestimientos interiores y exteriores.
- Sobrelosas para suelos rígidos o flexibles.

7. Bibliografía

Libros:

- Weigler Helmut, Karl Sieghart. Hormigones ligeros armados. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona 1974.

Tesis y memorias:

- Lizama Angelo. Propiedades mecánicas y aplicaciones del mortero celular. Memoria Departamento de Obras Civiles, UTFSM, Casa Central, Valparaíso, Chile.
- Costa Del Pozo, Antonella. Estudio de Hormigones y Morteros Aligerados con Agregados de Plástico Reciclado Como Árido y Carga en la Mezcla. Tesina (Máster en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente). Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña, 2012.
- Siddique Rafat, Khatib Jamal, Kaur Inderpreet. Use of recycled plastic in concrete: A review. Thapar Institute of Engineering and Technology, Deemed University, Patiala, India. School of Engineering and the Built Environment, University of Wolverhampton, United Kingdom.
- Siddique Rafat, Naik Tarun R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview. Department of Civil Engineering and Mechanics, College of Engineering and Applied Science, UWM Center for By-Products Utilization, University of Wisconsin–Milwaukee, USA.
- Delarze Díaz, Paulina Alejandra. Reciclaje de Neumáticos y su Aplicación en la Construcción. Tesis (Constructor Civil). Valdivia. UACH, Escuela de Construcción Civil, 2008.
- C.Albano, N. Camacho, M. Hernández. Estudio de concreto elaborado con caucho reciclado de diferentes tamaños de partículas. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela

Artículos y publicaciones:

- Evaluación impacto ambiental, acuerdos de producción limpia prevención y valoración de neumáticos fuera de uso. CINC, 2013.
- Informe anual medio ambiental. MMA, 2016.
- Tercer reporte de estado del medio ambiente. MMA, 2017.
- Antecedentes del manejo y gestión de residuos en Chile. AdaptChile, 2016.
- LEY N°20.920 Marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. MMA, 2016.

Normas:

- NCh-1037 Hormigón- Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas, 1977.
- NCh-158 Cemento – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento, 1967.
- NCh-1017 Hormigón Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción. 1975.
- NCh-1019 Construcción Hormigón Determinación de la docilidad Método del asentamiento del cono de Abrams. 1974.
- NCh 2256-1 Morteros – Parte 1: Requisitos Generales.
- NCh-2257-1 Morteros Determinación de la consistencia Parte I Método del extendido en la mesa de sacudidas. 1996.

Páginas web:

- www.asipla.cl
- www.cinc.cl
- www.salmonexpert.cl/noticias/reciclaje-del-plastico-en-chile/
- www.plasticseurope.org/es
- www.archiexpo.es
- www.cambiaso.cl/prod_lineareciclaje

8. Anexos

Resultados: Mitades de probetas de mortero con caucho 40x40x160 [mm].

Mortero Referencial							
Probeta Prismática	Peso [gr]	Densidad [kg/m³]	Resistencia a Compresión				
			Carga 1 [kgf]	Carga 2 [kgf]	Prom. [kgf]	[kgf/cm²]	[Mpa]
H0-01	555,5	2170	5300	5350	5325	332,81	32,6
H0-02	571,7	2233	5300	5500	5400	337,50	33,1
H0-03	575,7	2249	5500	5350	5425	339,06	33,3
H0-04	578,5	2260	5500	5650	5575	348,44	34,2
Promedio	570,4	2228	5400	5463	5431	339,45	33,3
Desv. Est.	8,91	40,18	100,00	124,37	90,79	5,67	0,64
Coef. Var	0,016	1,803	0,019	0,023	0,017	0,017	1,930
Mortero 10% Caucho							
Probeta Prismática	Peso [gr]	Densidad [kg/m³]	Resistencia a Compresión				
			Carga 1 [kgf]	Carga 2 [kgf]	Prom. [kgf]	[kgf/cm²]	[Mpa]
C10-02	533,8	2085	3750	3600	3675	229,69	22,5
C10-03	537,2	2098	3850	3800	3825	239,06	23,4
C10-01	559,2	2184	3650	3750	3700	231,25	22,7
C10-04	562,9	2199	3850	3800	3825	239,06	23,4
Promedio	548,3	2142	3775	3738	3756	234,77	23,0
Desv. Est.	12,90	58,18	82,92	81,97	69,32	4,33	0,49
Coef. Var	0,024	2,716	0,022	0,022	0,018	0,018	2,131
Mortero 30% Caucho							
Probeta Prismática	Peso [gr]	Densidad [kg/m³]	Resistencia a Compresión				
			Carga 1 [kgf]	Carga 2 [kgf]	Prom. [kgf]	[kgf/cm²]	[Mpa]
C30-02	481,7	1882	1880	1940	1910	119,38	11,7
C30-03	483,0	1887	2070	1800	1935	120,94	11,9
C30-01	489,5	1912	2030	1970	2000	125,00	12,3
C30-04	502,0	1961	2000	2050	2025	126,56	12,4
Promedio	489,1	1910	1995	1940	1968	122,97	12,1
Desv. Est.	8,04	36,26	70,89	90,28	46,70	2,92	0,33
Coef. Var	0,016	1,898	0,036	0,047	0,024	0,024	2,741
Mortero 50% Caucho							
Probeta Prismática	Peso [gr]	Densidad [kg/m³]	Resistencia a Compresión				
			Carga 1 [kgf]	Carga 2 [kgf]	Prom. [kgf]	[kgf/cm²]	[Mpa]
C50-01	434,3	1696	750	770	760	47,50	4,7
C50-02	432,4	1689	870	835	852,5	53,28	5,2
C50-03	434,7	1698	750	730	740	46,25	4,5
C50-04	439,6	1717	810	860	835	52,19	5,1
Promedio	435,3	1700	795	799	797	49,80	4,9
Desv. Est.	2,66	11,99	49,75	51,52	47,81	2,99	0,34
Coef. Var	0,006	0,705	0,063	0,065	0,060	0,060	6,927

Resultados: Probetas de Mortero con PEBD de 150x300 [mm].

Mortero Referencial						
Probeta Cilíndrica	Peso [kg]	Densidad [kg/m³]	Resistencia a Compresión			
			Carga [KN]	Carga [kgf]	Esfuerzo [kgf/cm²]	Esfuerzo [Mpa]
H0-C1	12,28	2316	685,20	68520	387,74	38,0
H0-C2	12,23	2307	655,00	65500	370,65	36,3
H0-C3	12,23	2307	665,30	66530	376,48	36,9
H0-C4	12,18	2298	667,40	66740	377,67	37,0
H0-C5	12,13	2288	675,70	67570	382,37	37,5
Promedio	12,21	2303	669,72	66972	378,98	37,2
Desv. Est.	0,05	10,75	10,17	1016,85	5,75	0,63
Coef. Var	0,004	0,467	0,015	0,015	0,015	1,698
Mortero 10% Pellet						
Probeta Cilíndrica	Peso [kg]	Densidad [kg/m³]	Resistencia a Compresión			
			Carga [KN]	Carga [kgf]	Esfuerzo [kgf/cm²]	Esfuerzo [Mpa]
P10-C1	11,14	2101	424,54	42454	240,24	23,6
P10-C2	11,15	2103	436,96	43696	247,27	24,2
P10-C3	11,10	2094	418,78	41878	236,98	23,2
P10-C4	11,09	2092	432,28	43228	244,62	24,0
P10-C5	11,13	2099	423,46	42346	239,63	23,5
Promedio	11,122	2098	427,204	42720	241,75	23,7
Desv. Est.	0,02	4,88	6,53	652,72	3,69	0,40
Coef. Var	0,002	0,233	0,015	0,015	0,015	1,708
Mortero 20% Pellet						
Probeta Cilíndrica	Peso [kg]	Densidad [kg/m³]	Resistencia a Compresión			
			Carga [KN]	Carga [kgf]	Esfuerzo [kgf/cm²]	Esfuerzo [Mpa]
P20-C1	10,58	1996	316,8	31680	179,27	17,6
P20-C2	10,55	1990	296,8	29680	167,95	16,5
P20-C3	10,58	1996	304,5	30450	172,31	16,9
P20-C4	10,56	1992	307,8	30780	174,18	17,1
P20-C5	10,59	1998	272,8	27280	154,37	15,1
Promedio	10,57	1994	299,74	29974	169,62	16,6
Desv. Est.	0,01	3,10	14,92	1492,03	8,44	0,93
Coef. Var	0,001	0,155	0,050	0,050	0,050	5,565
Mortero 30% Pellet						
Probeta Cilíndrica	Peso [kg]	Densidad [kg/m³]	Resistencia a Compresión			
			Carga [KN]	Carga [kgf]	Esfuerzo [kgf/cm²]	Esfuerzo [Mpa]
P30-C1	9,06	1709	264,00	26400	149,39	14,7
P30-C2	9,35	1764	236,85	23685	134,03	13,1
P30-C3	9,34	1762	251,25	25125	142,18	13,9
P30-C4	9,45	1783	252,90	25290	143,11	14,0
P30-C5	9,07	1711	246,45	24645	139,46	13,7
Promedio	9,25	1746	250,29	25029	141,64	13,9
Desv. Est.	0,16	33,55	8,84	884,39	5,00	0,55
Coef. Var	0,017	1,922	0,035	0,035	0,035	3,951

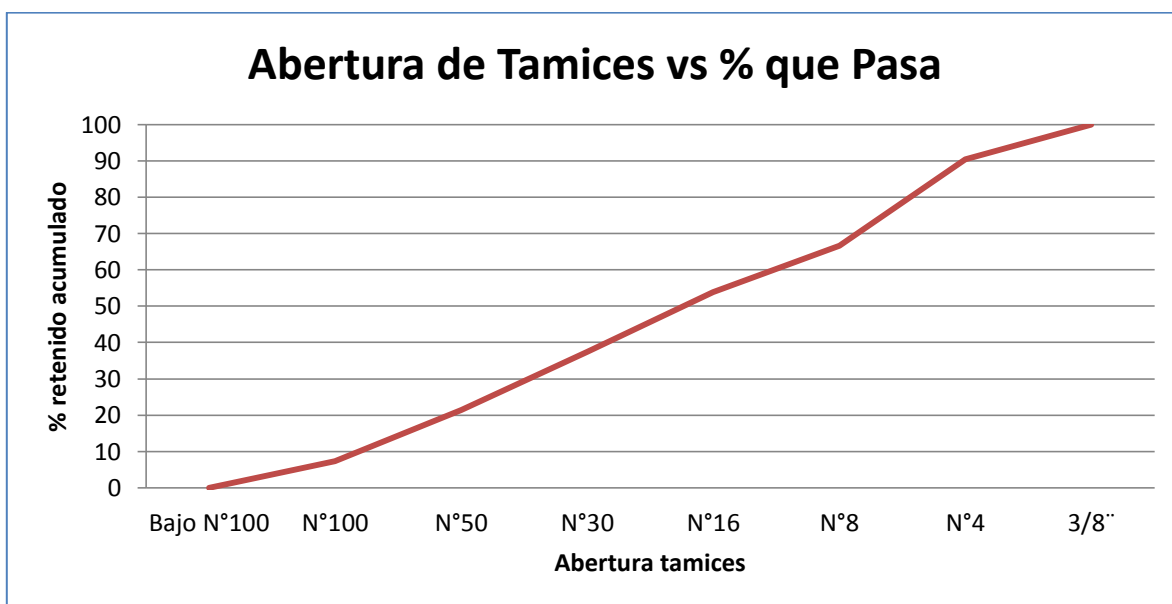
Resultados: Probetas de Mortero con PEBD de 150x300 [mm].

Mortero referencia						
Probeta Cilíndrica	Peso [kg]	Densidad [kg/m³]	Resistencia a Compresión			
			Carga [kN]	Carga [kgf]	Esfuerzo [kgf/cm²]	Esfuerzo [Mpa]
H0-C1	12,13	2288	675,70	67570	382,37	37,5
H0-C2	12,18	2298	667,40	66740	377,67	37,0
H0-C3	12,23	2307	655,00	65500	370,65	36,3
H0-C4	12,23	2307	665,30	66530	376,48	36,9
H0-C5	12,28	2316	685,20	68520	387,74	38,0
Promedio	12,19	2300	665,85	66585	376,79	37,2
Desv. Est.	0,05	10,75	10,17	1016,85	5,75	0,63
Coef. Var	0,004	0,468	0,015	0,015	0,015	1,698
Mortero 10% Chips						
Probeta Cilíndrica	Peso [kg]	Densidad [kg/m³]	Resistencia a Compresión			
			Carga [kN]	Carga [kgf]	Esfuerzo [kgf/cm²]	Esfuerzo [Mpa]
P10-C1	11,48	2166	615,94	61594	348,55	34,2
P10-C2	11,57	2182	616,84	61684	349,06	34,2
P10-C3	11,67	2201	606,32	60632	343,11	33,6
P10-C4	11,86	2237	606,58	60658	343,25	33,7
P10-C5	12,24	2309	600,99	60099	340,09	33,4
Promedio	11,76	2219	609,33	60933	344,81	33,8
Desv. Est.	0,27	56,82	6,10	610,36	3,45	0,38
Coef. Var	0,023	2,560	0,010	0,010	0,010	1,120
Mortero 20% Chips						
Probeta Cilíndrica	Peso [kg]	Densidad [kg/m³]	Resistencia a Compresión			
			Carga [kN]	Carga [kgf]	Esfuerzo [kgf/cm²]	Esfuerzo [Mpa]
P20-C1	11,10	2094	569,2	56920	322,10	31,6
P20-C2	11,11	2096	548,2	54820	310,22	30,4
P20-C3	11,26	2124	574,1	57410	324,87	31,9
P20-C4	11,61	2190	562	56200	318,03	31,2
P20-C5	11,66	2199	569	56900	321,99	31,6
Promedio	11,35	2141	564,5	56450	319,44	31,3
Desv. Est.	0,24	50,96	9,02	901,60	5,10	0,56
Coef. Var	0,021	2,380	0,016	0,016	0,016	1,786
Mortero 30% Chips						
Probeta Cilíndrica	Peso [kg]	Densidad [kg/m³]	Resistencia a Compresión			
			Carga [kN]	Carga [kgf]	Esfuerzo [kgf/cm²]	Esfuerzo [Mpa]
P30-C1	10,69	2016	522,5	52250	295,67	29,0
P30-C2	10,78	2033	531,6	53160	300,82	29,5
P30-C3	10,88	2052	551,8	55180	312,25	30,6
P30-C4	11,21	2115	540,3	54030	305,75	30,0
P30-C5	11,26	2124	546,4	54640	309,20	30,3
Promedio	10,96	2068	538,52	53852	304,74	29,9
Desv. Est.	0,23	48,47	10,45	1045,13	5,91	0,65
Coef. Var	0,021	2,344	0,019	0,019	0,019	2,170

Granulometría arena negra gruesa

Banda granulométrica de la Arena Gruesa utilizada en la fabricación de probetas, según NCh 165.

Tamiz	Peso retenido	% Ret Parcial	% Ret acumulado	% Que pasa
3/8"	0	0	0	100
N°4	52	9,45	9,45	90,55
N°8	131	23,82	33,27	66,73
N°16	71	12,91	46,18	53,82
N°30	90	16,36	62,55	37,45
N°50	88	16	78,55	21,45
N°100	78	14,18	92,73	7,27
Bajo N°100	40	7,27	100	0



Límites mínimos y máximos para granulometría de arena gruesa en NCh 163.

Tamices	% mín que debe pasar	% máx que debe pasar	Granulometría obtenida
Bajo N°100	0	0	0
N°100	2	10	7,27
N°50	10	30	21,45
N°30	25	60	37,45
N°16	50	85	53,82
N°8	80	100	66,73
N°4	95	100	90,55
3/8"	100	100	100,00

Densidad real, neta, y absorción

Masas obtenidas según NCh 1239 con las cuales se obtuvieron las densidades reales de la arena gruesa.

$M_{ss} = 305$ [g]

$M_s = 301$ [g]

$M_A = 687$ [g]

$M_M = 876$ [g]

Determinación del contenido de humedad

Este ensayo fue realizado según NCh 1515 Of. 79 obteniendo los siguientes resultados:

Peso inicial de la muestra: 0,60000 [kg]

Peso final de la muestra: 0.57048 [kg]

$W_w = 0.02952$ [kg]

$W_s = 0.60000$ [kg]

$W = 4.92\%$

Contenido de humedad en la muestra

$$w = (W_w / W_s) * 100 \quad (\%)$$

donde:

w = contenido de humedad expresado en %

W_w = peso del agua existente en la masa de suelo

W_s = peso de las partículas sólidas