



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL USO DE PET RECICLADO
COMO REEMPLAZO PARCIAL DE ÁRIDOS FINOS EN HORMIGONES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

FRANCISCA VALENTINA CARREÑO CORNEJO

PROFESORA GUÍA:
CARMEN MUÑOZ EFFA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MILENKO OGAZ CARRASCO
JACQUES BORNAND ARAYA

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil,
Mención Estructuras y Construcción

POR: Francisca Valentina Carreño Cornejo

FECHA: 17/08/2020

PROFESOR GUÍA: Carmen Muñoz Effa

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL USO DE PET RECICLADO COMO REEMPLAZO PARCIAL DE ÁRIDOS FINOS EN HORMIGONES

Este trabajo tiene como objetivo verificar la factibilidad de una proporción óptima de reemplazo de áridos finos o arena, por PET (polietileno tereftalato), un polímero de condensación termoplástico, y que se utiliza como material en la elaboración de diversos productos, siendo los envases de bebida la mayor parte de estos. El análisis se realiza en función de investigaciones y pruebas ya ejecutadas, las cuales muestran resultados variables respecto a resistencia de compresión, tracción y flexión, absorción de agua y módulo de elasticidad.

Los estudios muestran que la cantidad de sustitución de agregados finos por PET no puede superar el 20%, independiente de la cantidad de kilogramos de cemento, la relación agua-cemento, la cantidad y la forma del PET, debido a que mezclas con alto porcentaje de reemplazo presentan una pérdida en la resistencia a la compresión de hasta un 65% respecto a un hormigón convencional. Para mezclas con porcentaje menor al 20% existe una alta variabilidad en la resistencia, sin embargo, gran parte de estas pueden ser consideraras aceptables para su uso, siendo el rango entre 0,5% a 10% de reemplazo el cual presenta mejores resultados respecto a los ensayos de resistencia a la compresión, inclusive, dicha propiedad se puede aumentar hasta en un 28% al utilizarse PET reciclado en la mezcla.

A partir del análisis, se propone una dosificación de un hormigón con una resistencia en específico de 25 MPa a la compresión (G25) y un reemplazo del 10% de PET reciclado por agregados finos, donde dicho hormigón debiera poder ser considerado como aceptable dentro de los criterios establecidos por la ACI318-11. La fabricación de este hormigón excede en \$7.190 a uno convencional por metro cúbico, sin embargo, si se fabricaran 8.704 m³ de hormigón (lo cual representa el 0,1% de metros cúbicos producidos el año 2019 en el país), se podría reutilizar la cantidad de botellas de PET consumidas por 210.423 personas al año en Chile.

Dentro de los posibles usos de este concreto, se propone como material de vivienda liviana y para la elaboración de hormigón prefabricado.

El foco de esta investigación se encuentra en la sustentabilidad dentro del área de la construcción, ya que dadas las condiciones ambientales actuales es necesario desarrollar nuevas tecnologías que nos permitan seguir un desarrollo sostenible.

“A mi tía Pati”

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi madre, Pamela y a mis dos papás, Orlando y Jaime (de sangre y no sangre), por siempre ayudarme, apoyarme y cuidarme con todo su amor. A mi hermana Karen y mis hermanos peludos, en especial a mi gata Pelusa, por acompañarme desde octavo básico, en las alegrías, tristezas, traspasos y resfríos. A mi familia, abuelos, tíos, primos que siempre me acogieron y me dieron una palabra de aliento.

En el fin de este largo trayecto también quiero agradecer a la Amanda, quién fue la primera amiga que me acompañó en tantas aventuras y me dio ánimos de seguir adelante en todos mis sueños. A la Rosa y Gianni, por las noches de risas, chismes y apoyo. A los chicos de plan común, quienes me adoptaron para estudiar cuando veía todo negro en primer año y me integraron, Tiare, Checho, Caro, Gabi, Andrés, Nico, Nati, muchas gracias. A los chicos de Civil, Nico, Benja, Diego y a todos los Arrieros que hicieron mi estadía en el departamento, más alegre, entretenido y llevadero. A los niños con quienes interactuamos más allá de los estudios, siendo el gimnasio nuestro punto fallido de partida, Basti y Cyntia, gracias por siempre estar para mí. Al mejor amigo que me entrego esta universidad, Ariel, espero que sigamos juntos por muchos años más. Finalmente, a Claudio, por ser mi compañero y amigo en estos tiempos de incertidumbre, desvelo y llanto, por quererme, cuidarme y siempre hacerme sentir que puedo con todo.

Gracias también a la profesora Carmen, que a pesar de la pandemia que nos afecta, se dio el tiempo de guiarme, ayudarme y aconsejarme para terminar este trabajo.

Este año ha sido muy difícil para todos, y eso me ha hecho apreciar aún más a aquellos que me han acompañado a lo largo de la vida y enseñanza. Me faltan hojas para nombrar a todos ellos, así que solo diré gracias por estar y no estar (las penas igual se agradecen), porque de alguna u otra forma, me ayudaron a crecer y ser quien soy hoy en día.

Tabla de contenido

Capítulo 1

1. Introducción	1
1.1. Justificación.....	1
1.2. Objetivo general	2
1.3. Objetivos Específicos	2
1.4. Metodología	3

Capítulo 2

2. Marco Teórico.....	4
2.1. Definiciones, Características y Procesos de elaboración de los materiales	4
2.1.1. Hormigón	4
2.1.2. Tereftalato de polietileno (PET)	8
2.2. Usos del PET en elementos Constructivos	10
2.2.1. Morteros	10
2.2.2. Pavimentos.....	12
2.2.3. Ladrillos.....	13
2.2.4. Otros ejemplos de interés	14
2.3. Normativa Nacional e Internacional	16

Capítulo 3

3. Hormigón con PET reciclado	21
3.1. Experiencias previas	21
3.2. Análisis de estudios.....	39
3.2.1. Resumen de los casos de estudio	39
3.2.2. Análisis de resistencia de los hormigones	40
3.3. Planteamiento de dosificación	45
3.3.1. Memoria de cálculo	45
3.4. Propuesta de Caracterización.....	50
3.4.1. Áridos	50
3.4.2. Hormigón	50

Capítulo 4

4.	Estudio de mercado e impacto ambiental.....	52
4.1.	Análisis comercial	52
4.1.1.	Contexto comercial del hormigón en Chile y el Mundo	52
4.1.2.	Costos en la producción de hormigón con agregado PET	54
4.2.	Análisis ambiental.....	56
4.2.1.	Impacto ambiental en la generación de plástico.....	56
4.2.2.	Impacto ambiental en el ámbito de la construcción a nivel nacional	59
4.2.3.	Análisis de ciclo de vida hormigón con agregado PET como reemplazo de áridos finos	62
4.3.	Ventajas y Desventajas de un Hormigón con agregado PET como reemplazo parcial de áridos finos	63
4.4.	Posibles usos.....	66

Capítulo 5

5.	Conclusiones.....	69
5.1.	Conclusiones generales y observaciones	69
5.2.	Futuras líneas de investigación.....	71
	Bibliografía	72
	ANEXO A.....	81
	ANEXO B	83
	ANEXO C	91
	ANEXO D.....	92
	ANEXO E.....	93

Índice de Tablas

Tabla 1: Propiedades Intrínsecas del PET.....	9
Tabla 2: Propiedades mecánicas de los morteros.....	11
Tabla 3: Descripción general de la composición de áridos reciclados.....	18
Tabla 4: Descripción general de los requisitos de áridos reciclados.....	19
Tabla 5: Resistencia a la compresión del concreto con un 5% de reemplazo de arena por PET reciclado.....	25
Tabla 6: Propiedades mecánicas de los hormigones.....	26
Tabla 7: Resistencia a la compresión, flexión y módulo de elasticidad a los 28 días.	31
Tabla 8: Resistencia a la compresión promedio (0% ceniza volante) N/mm ²	33
Tabla 9: Resistencia a la compresión promedio (5% ceniza volante) N/mm ²	33
Tabla 10: Resistencia a la compresión promedio (10% ceniza volante) N/mm ²	33
Tabla 11: Resistencia a la compresión promedio (15% ceniza volante) N/mm ²	33
Tabla 12: Resumen resultados ensayos técnicos.	38
Tabla 13: Resumen resultados Ensayos Técnicos.....	38
Tabla 15: Granulometría, densidad relativa y absorción de la arena y gravilla.	46
Tabla 16: Distribución granulométrica para PET reciclado.....	47
Tabla 17: Árido combinado para Zona 1 según NCh163 Of.2013.	48
Tabla 18: Árido combinado para Zona 2 según NCh163 Of.2013.	48
Tabla 19: Volumen de áridos para diferentes mezclas según dosificación de 1 m ³ de hormigón.....	49
Tabla 20: Dosificación para cada zona establecida por la NCh163 Of.2013 y cada porcentaje de reemplazo por PET.....	49
Tabla 21: Top 25 productores de hormigón en el mundo ordenados por volumen de hormigón vendido en el año 2017.....	52
Tabla 22: Cementos comercializados en el país (en pesos chilenos).	54
Tabla 23: Distribuidores de áridos.	55
Tabla 24: Precio del Hormigón en pesos chilenos por metro cubico (al por menor).....	55
Tabla 25: Composición residuos de la construcción en Chile.....	59
Tabla 26: Factores de emisión para algunas etapas en el procesamiento de áridos y agregados.	61
Tabla 27: Factores de emisión para etapas en la producción de materiales de cemento y hormigón y actividades asociadas.....	62
Tabla 28: Emisión de CO ₂ eq y consumo energético para la extracción de materias primas del producto.	63
Tabla 29: Emisión de CO ₂ eq y consumo energético para todo el ciclo de vida del producto.....	63
Tabla 30: Análisis global de muestras.....	64
Tabla 31: Análisis global de muestras con reemplazo del 5% y 10% de áridos finos por PET.....	64

Índice de Figuras

Figura 1: Factores que influyen en la calidad del concreto (Orozco et al., 2018).....	7
Figura 2: Estructura y ecuación química del PET (Welle, 2017).....	8
Figura 3: Inyección por Soplado: Recomendaciones de Proceso (Nurel Biopolymers, 2020).....	9
Figura 4: Flujo del mortero (Choi et al., 2009).	11
Figura 5: Ladrillo prefabricado con plástico reciclado (Gaggino, 2009).....	13
Figura 6: Ensayos de resistencia a la compresión para envases de PET. (Izq) Disposición individual. (Der) Disposición Grupal (Botero et al., 2014).....	14
Figura 7: Probetas de madera plástica para ensayos de impacto (García et al., 2013).....	16
Figura 8: Distribución de artículos según el tipo de uso del PET reciclado y mezcla realizada.....	21
Figura 9: Relación entre resistencia a la compresión y porcentaje de residuos plásticos reciclado (Choi et al., 2005).	22
Figura 10: Resistencia a la compresión del concreto (Choi et al., 2009).....	23
Figura 11: Resistencia a la compresión de mezclas de concreto y PET versus edad de curado a una relación A/C de 0,5 (Albano et al., 2009).	24
Figura 12: Resistencia a la compresión de mezclas de concreto y PET versus edad de curado a una relación A/C de 0,6 (Albano et al., 2009).	24
Figura 13: Resistencia a la compresión en términos de tiempo de curado para hormigones elaborados con PET reciclado (Galvão et al., 2011).....	26
Figura 14: Resistencia a la compresión vs fibra plástica (%) (Ramadevi y Manju, 2012).27	
Figura 15: Resistencia a la tracción vs fibra plástica (%) (Ramadevi y Manju, 2012).	27
Figura 16: Resistencia a la flexión vs fibra plástica (%) (Ramadevi y Manju, 2012).	28
Figura 17: Tipos de plásticos utilizados para el programa experimental (a) PC, (b) PF y (c) PP.	28
Figura 18: Resultados de resistencia a la compresión según las diferentes condiciones de curado a los 28 días (Ferreira et al., 2012).....	29
Figura 19: Resultados de resistencia a la compresión según las diferentes condiciones de curado a los 28 días (Elaboración propia a partir de los datos de Silva et al., 2013).	29
Figura 20: Resistencia a la compresión versus la incorporación de agregado PET como reemplazo de árido fino (Saikia y de Brito, 2014).	30
Figura 21: Resistencia a la compresión versus la incorporación de agregado PET como reemplazo de árido fino (Saikia y de Brito, 2014).	30
Figura 22: Influencia de varios de tipos de agregados de PET en el módulo de elasticidad en el hormigón (Saikia y de Brito, 2014).....	31
Figura 23: Resistencia a la compresión versus porcentaje de adición de PET reciclado, para un hormigón M20 (Elaboración propia a partir de los datos de Nibudey et al., 2013).....	32
Figura 24 Resistencia a la compresión versus porcentaje de adición de PET reciclado, para un hormigón M30 (Elaboración propia a partir de los datos de Nibudey et al., 2013).....	32

Figura 25: Resistencia a la compresión vs residuos plásticos (%) para grado M30 de hormigón (Vali y Assadi, 2017).	34
Figura 26: Resistencia a la compresión vs residuos plásticos (%) para grado M25 de hormigón (Vali y Assadi, 2017).	35
Figura 27: Resistencia a la compresión vs residuos plásticos (%) para grado M20 de hormigón (Vali y Assadi, 2017).	35
Figura 28: Resistencia a la flexión vs residuos plásticos (%) para grado M30 de hormigón (Vali y Assadi, 2017).	36
Figura 29: Resistencia a la flexión vs residuos plásticos (%) para grado M25 de hormigón (Vali y Assadi, 2017).	36
Figura 30: Resistencia a la flexión vs residuos plásticos (%) para grado M20 de hormigón (Vali y Asadi, 2017).	36
Figura 31: Bloque de hormigón H15 fabricado para los ensayos (Beltran y Ferreira, 2018).	37
Figura 32: Cantidad de muestras versus porcentaje de reemplazo de PET por agregados finos.	39
Figura 33: Diferencia de resistencia a la compresión (28 días) de un hormigón con agregado PET (%) respecto a una muestra patrón.	40
Figura 34: Porcentaje de muestras que cumplen con los criterios estipulados para resistencia a la compresión a una edad de 28 días.	41
Figura 35: Porcentaje de muestras que cumplen con los criterios estipulados para resistencia a la flexión.	42
Figura 36: Porcentaje de muestras que cumplen con los criterios estipulados para resistencia a la tracción por hendimiento.	42
Figura 37: Relación entre cantidad de muestras totales y aquellas que cumplen con una resistencia superior al 90% del hormigón patrón, según su relación agua-cemento.	43
Figura 38: Relación entre cantidad de muestras totales y aquellas que cumplen con una resistencia superior al 90% del hormigón patrón, según la cantidad de cemento.	43
Figura 39: Porcentaje de muestras que cumplen con la resistencia a la compresión de diseño.	44
Figura 40: Resistencia a la compresión versus porcentaje de reemplazo para un hormigón G25.	45
Figura 41: Despachos de hormigón en Chile en <i>m</i> 3 por año (Elaboración propia a partir de los datos de la CChC).	54
Figura 42: Porcentajes relativos a la demanda de plásticos en Europa el año 2019 (PlasticsEurope, 2019).	56
Figura 43: Evolución de tratamientos para desechos de plásticos 2006-2018 en la Unión Europea, Noruega y Suiza (PlasticsEurope, 2019).	58
Figura 44: Pirámide Invertida de jerarquización de gestión de residuos (RECYLINK, 2019).	60
Figura 45: Diagrama de beneficios ambientales que puede generar la utilización de PET en hormigones a nivel nacional.	65
Figura 46: Diagrama de beneficios ambientales que puede generar la utilización de PET en hormigones a nivel mundial.	65

Figura 47: Auto-construcción utilizando ladrillos y placas de ladrillos con plástico reciclado (Gaggino, 2008)..... 66

Figura 48: Hormigonado de elementos sándwich con una base de RCD y productos finales (fábrica de hormigón Creagh) (PHI, 2020). 67

Figura 49: Edificio de demostración: el nuevo centro de I+D de Creagh; primera y última fase de construcción (PHI, 2020). 68

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Justificación

La contaminación ambiental ha alcanzado niveles críticos debido a la industrialización que genera elementos no reutilizables o de un solo uso, lo que provoca que gran parte de estos materiales terminen en basurales, rellenos sanitarios o vertederos, sin embargo, otra parte no despreciable termina en ríos, mares, y vertederos ilegales o microbasurales afectando el hábitat natural y poniendo en peligro a la vida silvestre, así como también, reduciendo la calidad de vida de comunidades que deben enfrentarse a este tipo de contaminación día a día.

Los residuos tienen diferentes tiempos de degradación, y ello se debe a su composición química y el ambiente en el cual se encuentra inserto una vez termina su vida útil, por ejemplo, el papel toma entre 1,5 y 15 años en degradarse mediante un relleno sanitario, mientras que en una compostera demora alrededor de 60 días aproximadamente. El polietileno no se degrada en procesos de compostera, aunque si sufre cierto grado de degradación, pero aún no se puede especificar a qué tipo de proceso se debe. Se ha visto que en ambientes marinos este plástico reduce su resistencia mecánica y se fragmenta en microplásticos. Actualmente, no hay estudios científicos suficientes que permitan determinar cuánto tarda en degradarse un residuo plástico, pero se estima que este proceso tomará muchos años (Navarro et al., 2019, pp.16-19).

Cada año se consumen en Chile 990.000 toneladas de resinas plásticas, pero solo se reciclan 83.679 toneladas, es decir, solo el 8,5% del consumo anual del país. Una tasa baja, pero que va en línea con las tasas de reciclaje generales de Chile, que de acuerdo con diversos estudios oscila entre un 4 y un 10% según la OCDE (Molina y González, 2019). Por otro lado, se observa que cada año se reciclan alrededor de 7.500 toneladas de tereftalato de polietileno o más conocido como PET, plástico utilizado principalmente para fabricar botellas de agua y bebidas gaseosas, que cada año presentan un aumento en la cantidad de producción.

La industria de la construcción en Chile, por otro lado, ha crecido económicamente, aumentando su PIB desde el año 2000 a 2010 en un 120% según las estadísticas del banco central, este sector aportó en el año 2017 alrededor del 6,48% al PIB nacional, lo que corresponde a unos 12.000 miles de millones de pesos. Esta industria es, a su vez una de las que más residuos genera, produciendo el 56% de los residuos sólidos a nivel industrial en el año 2009, lo que corresponde a 5,82 millones de toneladas (CONAMA, 2010). Es posible ver entonces, que esta industria es un eje económico muy importante y a su vez,

más influyente en cuanto a la generación de residuos, por tanto, es necesario avanzar constantemente en el desarrollo tecnológico de nuevos procesos constructivos, así como sistemas más eficientes y en la elaboración de nuevos materiales

Dentro de los residuos sólidos que genera la industria de la construcción, se encuentran los materiales de albañilería como ladrillos o azulejos, hormigón, áridos, plásticos, metales, vidrios, madera, suelo, entre otros. Del grupo anterior se observa que el hormigón, el suelo y los áridos representan el mayor porcentaje en cuanto a residuos (CITECUBB, 2017), se hace necesario entonces, estudiar este tipo de materiales y las problemáticas que generan este tipo de resultados, para buscar opciones que ayuden a mitigar el impacto ambiental y las ineficiencias energéticas producidas en el rubro.

El hormigón es el material más usado en la construcción después del agua, dado que se puede aplicar en diferentes tipos de obras como fundaciones, edificación en altura, pavimentos, puentes, entre otros. El material se compone principalmente por cemento, agua, áridos como la grava, gravilla y arena, además de aditivos o adiciones que le otorgan cualidades especiales.

Estos datos ayudan a comprender la importancia de estudiar nuevos tipos de materiales y al mismo tiempo reutilizar elementos que generan daño al ambiente al no ser fácilmente degradable. Actualmente, hay empresas que utilizan residuos de hormigón para realizar áridos y agregados que se usan para subbase de carreteras o barreras de contención, así como también hay estudios acerca del uso de PET reciclado para diferentes elementos de la construcción como ladrillos, pavimentos o madera. Uno de los usos más relevantes es el de la implementación del PET en hormigones y morteros como reemplazo porcentual de áridos finos.

Los estudios actuales referentes a hormigones con PET reciclado abordan diferentes tipos de combinaciones, por lo que es útil para la industria chilena el abordar este tema usando como referencia los materiales y áridos fabricados en el país, además de analizar el impacto de este nuevo material tanto en el ámbito económico como ambiental.

1.2. Objetivo general

Analizar técnica y económicamente el uso de PET reciclado como reemplazo parcial de áridos finos en hormigones para su uso en Chile.

1.3. Objetivos Específicos

- Analizar las características y propiedades del PET como un árido y literatura acerca de hormigones cuyos áridos sean reemplazados porcentualmente por PET reciclado.
- En base a la literatura, comparar resultados entre diferentes mezclas de hormigones, observando propiedades físicas y químicas destacables.

- Establecer una dosificación tal que el porcentaje de reemplazo de áridos finos no afecte la resistencia del hormigón en base a la literatura.
- Analizar económica y ambientalmente el uso porcentual de PET en hormigones para la industria nacional.

1.4. Metodología

Para cumplir con los objetivos anteriormente mencionados, se procede con la siguiente metodología:

- a) Recopilación de bibliografía de ensayos de hormigón y morteros con reemplazo porcentual de áridos finos por PET triturado, molido, tratado o en fibras.
- b) Recopilación bibliográfica de costos de producción de hormigón y su distribución a nivel nacional, así como su impacto medioambiental.
- c) Calcular dosificación a partir de los datos sobre el porcentaje óptimo estimado de reemplazo en hormigones, además de definir variables, constantes y propiedades que deberían controlarse en laboratorio.
- d) Concluir sobre el impacto que produciría el realizar este producto tanto económica como ambientalmente en la industria chilena.

Capítulo 2

2. Marco Teórico

2.1. Definiciones, Características y Procesos de elaboración de los materiales

2.1.1. Hormigón

Según el American Concrete Institute (2013), el hormigón se define como una mezcla de cemento hidráulico, agregados y agua, con o sin aditivos, fibras u otros materiales cementosos, dentro del mismo, se define también agregado como un material granular como arena, grava, piedra triturada, hormigón hidráulico triturado, entre otros.

Actualmente, la definición anterior se ve corta comparada a la amplia gama de materiales que componen el hormigón, ya que según Neville y Brooks (2010), este material puede ser fabricado con varios tipos de cemento, así como de elementos que mejoran sus propiedades, tales como la puzolana, cenizas volantes, escoria de alto horno, microsílice, y aditivos, agregados de hormigón reciclado, aditivos, polímeros, fibras, y así sucesivamente. Estos hormigones pueden ser calentados, curados con vapor, esterilizados en autoclave, tratados al vacío, presionados hidráulicamente, vibrados por choque, extruidos y rociados.

El origen de este material se remonta dos siglos A. de C. para construcciones que hasta el día de hoy aún subsisten, como los son el Panteón o la Iglesia de Santa María de los Mártires, esta última posee una cúpula de 44 metros de claro, que fue construida con hormigón simple, que en esos tiempos utilizaba caliza calcinada, tobas volcánica y piedra. Desde 1845 se empieza a construir en el sur de Francia objetos que combinaban el concreto y el acero, de esta forma, se utiliza el hormigón armado en diferentes construcciones como en el puente cerca de Chazetet en Francia, con un claro de 16,5 metros (Gutiérrez de López, 2003).

Actualmente, el hormigón reforzado u hormigón armado se define por la norma chilena NCh170 (2016) como *“hormigón que incorpora refuerzos, preesforzados o no, en una cuantía igual o superior a la mínima establecida en la norma de diseño correspondiente”*, siendo el grado mínimo de un hormigón reforzado, el de 17 MPa a la compresión o de manera abreviada G17, de acuerdo con la norma chilena NCh430.

Todos los componentes del hormigón juegan un rol fundamental en sus propiedades. Para entender a cabalidad sus características se definen las cualidades de cada uno de sus elementos:

▪ **Cemento**

El cemento se define por la ACI concrete Terminology (2013) como cualquier material que es capaz de unir y mantener juntas un conjunto de partículas, sin embargo, al referirnos especialmente del hormigón es necesario definir el cemento hidráulico, el cual es un material aglutinante que se endurece por reacción química con el agua y que, además, es capaz de hacerlo bajo el agua.

El cemento Portland es un cemento hidráulico obtenido a partir de la molienda conjunta de clínker y yeso y que puede aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluido el sulfato de calcio hidratado (Norma Chilena 148, 1968). A este cemento se le pueden agregar otras sustancias en la etapa de molienda del clínker para disminuir los costos y mejorar sus características. Al agregarse escorias este cemento pasa a llamarse portland siderúrgicos y cuando se agrega puzolana, se dice que el cemento es portland puzolánico (Gutiérrez de López, 2003).

Los cementos portland puzolánicos poseen mayor resistencia frente a los agentes químicos como sulfatos y mayor durabilidad frente a aguas ácidas y carbónicas agresivas, también desarrolla menor calor al fraguar, tiene menor dilatación y es más impermeable que un cemento portland, al disminuir la exudación y segregación (Calleja, 1977).

Uno de los beneficios económicos que posee este tipo de material, toma como referencia el reemplazo de clínker por puzolana, el cual va entre 25 y 40%, de esta forma la reducción en la producción del cemento impacta en los costos por el uso de combustible que se requiere para fabricarlo. Por otro lado, también se debe destacar el uso de cenizas volantes de centrales térmicas como puzolana, ya que a todo subproducto se le puede atribuir una parte de la energía gastada en el proceso que da lugar a él, de este modo, se puede aprovechar la energía gastada en su totalidad (Calleja, 1977).

En Chile, se trabaja principalmente con cemento con adiciones incorporadas, en espacial, de puzolana. Un dato no menor dado que se despachan alrededor de 350.000 toneladas de cemento al mes en el país¹.

• **Áridos**

Según la Norma Chilena 163 (2013), los áridos se definen como “*material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estables*” estos ocupan entre el 70 y 80% del volumen del concreto, es por esto que muchas de las cualidades del hormigón dependen de las características de los áridos o agregados (Gutiérrez de López, 2003). Podemos establecer a grandes rasgos dos tipos de áridos para la fabricación de hormigones, los áridos finos y gruesos.

¹ Cámara Chilena de la Construcción, Indicador: Índice Despacho de Cemento (últimos 12 meses con respecto a Marzo 2020).

Los áridos gruesos son los áridos retenidos en el tamiz de abertura 4,75 mm según la NCh163 (2013), estos son principalmente gravas y gravillas. Este tipo de árido debe tener una buena graduación y contar con tamaños intermedios para evitar problemas de segregación, así como también, evitar el uso de agregados planos o alargados ya que su ordenamiento al momento de ser colocados produce una reducción en la resistencia del hormigón final, estos deben estar limpios y se debe evitar que contengan más de un 3% de contenido de partículas finas, ya que su presencia impedita la correcta adherencia de los áridos con el cemento en la mezcla. Su densidad aparente se encuentra entre 2,3 y 2,9 g/cm³, cuanto mayor sea su densidad, mejor es su calidad y menor su absorción, que oscila entre el 1% y 5% (Gutiérrez de López, 2003).

Los áridos finos o arenas son aquellos que pasan por el tamiz de abertura 4,75 mm y son retenidos en el tamiz de 0,075 mm según la NCh163 (2013). Se caracterizan por ayudar con la lubricación entre los agregados gruesos dándole más manejabilidad al concreto, un exceso de este material se transfiere en una mayor demanda en la cantidad de agua para producir determinado asentamiento, mientras que, una falta de arena se refleja en la aspereza de la mezcla. Por otro lado, si existe presencia de materia orgánica en la arena que se utilizará en la mezcla de hormigón puede interrumpir de manera parcial o total el proceso de fraguado del hormigón (Gutiérrez de López, 2003).

Otra forma de catalogar los áridos es su procedencia como natural o artificial, según su granulometría, continua, discontinua e irregular o según su forma, chancada o rodada.

La normativa chilena actual no contempla los requisitos y especificaciones aplicables a los áridos reciclados, pesados, livianos o artificiales como el PET, por lo tanto, se debe revisar otras especificaciones o normativas al respecto.

- **Agua**

El agua en la mezcla de hormigón juega un rol muy importante en la hidratación del cemento y en la fluidez de la pasta dado que de esta forma se obtiene una manejabilidad adecuada del concreto. El agua debe ser apta para el consumo humano y libre de sustancias como aceites, ácido, sustancia alcalina y materias orgánicas (Gutiérrez de López, 2003), todo ello se encuentra normado en Chile por la NCh 1498 del año 2012.

Por otro lado, el agua también se ocupa para curar el hormigón, este procedimiento tiene como propósito según la NCh 170 (2016) el *“mantener la humedad y las condiciones de temperatura del hormigón, por el periodo de tiempo que se requiera, para que el hormigón alcance sus propiedades y se debe iniciar tan pronto como las operaciones de colocación del hormigón lo permita y/o las condiciones ambientales lo hagan necesario”*.

Los procesos de producción del hormigón constan del mezclado de los materiales principales, el transporte de la mezcla al lugar donde se desea utilizar, la colocación de

este en el espacio designado, la compactación del material, el acabado de ser necesario y finalmente el curado.

Todos estos procedimientos son fundamentales para obtener un producto de óptima calidad, ya que cualquier falla puede implicar una baja en la resistencia del hormigón con la cual fue diseñado, o un acabado poco refinado para el uso que se deseaba, llegando incluso a tener que demoler el concreto para realizarlo nuevamente.

Un estudio realizado por Orozco, Avila, Restrepo y Parody (2018), destacó que los factores que más influyen en la calidad del concreto basado en la opinión de expertos en el campo de la construcción y materiales, se debe al medio ambiente (temperatura media del entorno, velocidad del viento y humedad) para el proceso de curado, seguida por los métodos constructivos (procedimiento de hormigonado y verificación de las especificaciones técnicas y calidad en aspectos generales) en cuanto a colocación y compactación; materiales (cumplir con la dosificación de cada uno de los materiales por parte de las empresas de premezclado) y finalmente, maquinaria y mano de obra (véase Figura 1).

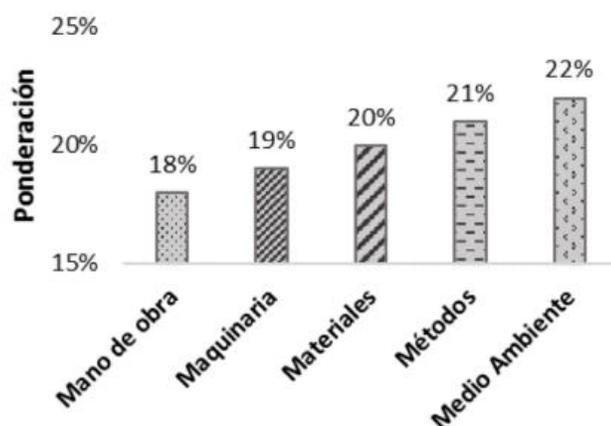


Figura 1: Factores que influyen en la calidad del concreto (Orozco et al., 2018).

El hormigón se clasifica según su resistencia mecánica, ya sea ésta a la compresión, a la tracción o la flexión. Según la NCh170 (2016), la resistencia a la compresión del hormigón se mide utilizando probetas cilíndricas que son testeadas a una edad de 28 días, el nombre del hormigón está compuesto por la denominación G, seguido por su resistencia en mega pascales mientras que la resistencia a la flexión se mide utilizando probetas prismáticas que son testeadas mediante la aplicación de cargas, cuando estas ya tienen una edad de 28 días, el nombre de este hormigón está compuesto por la denominación HF, seguido por la resistencia en mega pascales.

La densidad de este material depende de la densidad del agregado que se le añade a la mezcla. El hormigón ligero (llamado hormigón liviano en Chile) posee una densidad que va entre los 1.120 a 1.920 kg/m³ (ACI concrete Terminology, 2013) y se utiliza para la construcción de elementos secundarios en edificios y viviendas, que requieren de esta capacidad para reducir las cargas muertas, posee buena resistencia al fuego y aislación

térmica (Valdez, Suárez, Cadena, 2010); El hormigón normal posee una densidad aproximada de 2.400 kg/m³ y tiene diferentes usos como pavimentos, pilares, paredes, entre otros; El hormigón pesado o de alta densidad posee valor igual o superior a los 3000 kg/m³ dado que se ocupan áridos de mayor densidad, y es especialmente usado para la construcción de pantallas contra la radiación (ACI concrete Terminology, 2013).

2.1.2. Tereftalato de polietileno (PET)

El polietileno Tereftalato o más conocido por su abreviatura PET, es un poliéster termoplástico semicristalino (Webb, Arnott, Crawford, Ivanova, 2012). EL PET se fabrica a partir de ácido tereftálico (un ácido dicarboxílico) y etilenglicol (un dialcohol). Las dos sustancias reaccionan juntas para formar largas cadenas de polímeros, con agua como subproducto (Figura 2). Como la mayoría de los procesos de polimerización, también se requiere un catalizador (Welle, 2017).

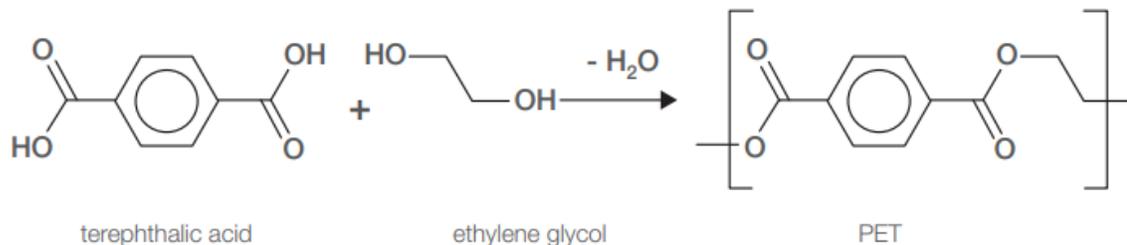


Figura 2: Estructura y ecuación química del PET (Welle, 2017).

Los poliésteres se fabricaron por primera vez en la década de 1930 para usarse como fibras sintéticas, y no fue hasta la década de 1970 en donde se desarrolló la producción de botellas de PET para envasar refrescos y luego de un tiempo, agua (Welle, 2017).

Entre las propiedades que se destacan de este material se encuentra la dureza y la durabilidad, además de ser un producto química y termalmente estable, tiene baja permeabilidad a los gases y es fácilmente elaborado a mano (Webb et al., 2012). El valor de las diferentes propiedades del PET puede observarse en la siguiente tabla. Cabe destacar que el grado de los valores que se indican dependen de la cristalinidad y polimerización del material.

Tabla 1: Propiedades Intrínsecas del PET.

Propiedad	Valor
Promedio del Peso Molecular	30.000-80.000 g mol ⁻¹
Densidad	1.41 g cm ⁻³
Temperatura de Fusión	255-265 °C
Módulo de Young	1700 MPa
Absorción de Agua (24h)	0,5%

Fuente: Webb et al. (2012).

Entre los usos que se asocian al PET encontramos fibras, hojas y películas, las que se usan para empaques de comida y bebestibles (especialmente, refrescos y botellas de agua), electrónica, partes de automóviles, productos de iluminación, herramientas eléctricas, artículos deportivos, aplicaciones fotográficas, hojas de rayos X y textiles (Webb et al., 2012).

Las botellas de PET se fabrican a partir de granulados de PET que se derriten a una temperatura aproximada de 280°C, que luego se procesan y moldean para elaborar preformas. Estas preformas ya tienen el hilo de la tapa de la botella y son pequeños y fáciles de transportar. Poco antes del proceso de llenado, las preformas se calientan a una temperatura de aproximadamente 110°C y dentro de un molde se soplan hasta que la botella obtenga su forma final. El proceso anteriormente descrito también puede elaborarse en una sola etapa, es decir, desde donde la preforma va directamente de la inyección a la etapa de soplado. Después, estas botellas pasan por una etapa de enfriamiento para posteriormente llenarse con bebida (Welle, 2017).

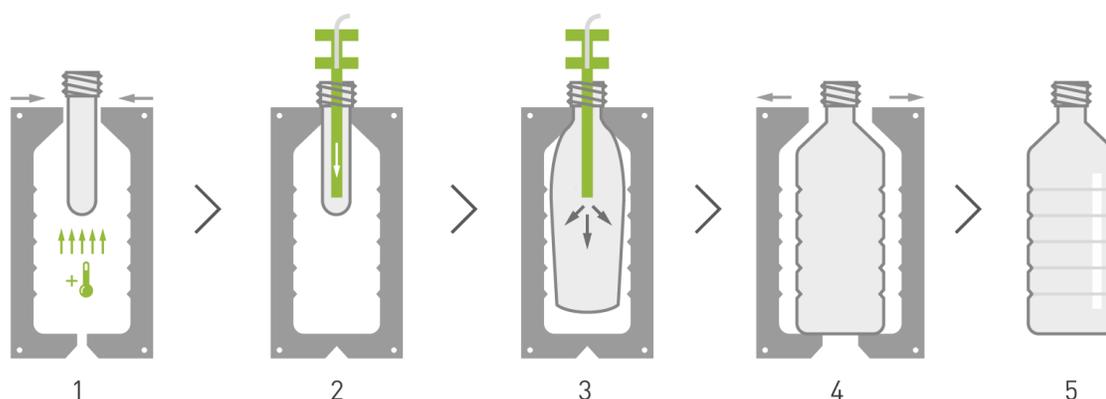


Figura 3: Inyección por Soplado: Recomendaciones de Proceso (Nurel Biopolymers², 2020).

El proceso descrito hace que el PET se cristalice parcialmente, de este modo, se mejora la estabilidad de la botella y mejora sus propiedades térmicas, además de generar una barrera contra el oxígeno y el dióxido de carbono. El PET no cristalino es altamente transparente mientras que el PET completamente cristalino es opaco y es usado, por ejemplo, para hacer platos de microondas y bandejas (Welle, 2017).

² Recuperado de <https://nurelbiopolymers.com/es/productos/inyeccion/inyeccion-soplado>

2.2. Usos del PET en elementos Constructivos

2.2.1. Morteros

Los morteros según el ACI (2013) se define como una mezcla entre agregados finos y pasta de cemento y son utilizados en muros de mampostería, su recubrimiento y también para pegar ladrillos. Las investigaciones actuales buscan reemplazar de manera parcial o completa el agregado fino de la mezcla y obtener resultados equiparables con un mortero convencional.

Akçaözöğlua y Atis (2011) realizaron morteros compuestos por tres partes: agua, PET reciclado y un aglutinante. Esta última variable a su vez se descompone en tres mezclas: cemento portland normal (CPN), CPN con agregado de escoria granulada de alto horno y CPN con ceniza volante. La distribución de cada material está definida por una relación del 60% entre el PET reciclado con el aglutinante y de un 45% y 50% entre agua-aglutinante, a modo de resumen, las mezclas poseían una cantidad de PET cercana al 30% del peso total del mortero. Los resultados de dicho estudio mostraron que las muestras que contenían solo CPN y CPN con escoria de alto horno presentan valores muy cercanos y más altos en cuanto a resistencia a la compresión (cerca a 24 MPa para una edad de 28 días), así mismo, también se observó que ambas mezclas obtienen valores similares en cuanto a resistencia a la flexión, mientras que el compuesto con ceniza volante muestra valores más bajos.

Finalmente, al realizar un análisis de profundidad de carbonatación se obtuvieron mejores resultados al utilizar una mezcla cuya relación PET-aglutinante era del 45%, ya que, una alta relación influye en la mezcla con una baja trabajabilidad lo que provoca una estructura más porosa, de esta forma, el CO₂ puede penetrar en los poros abiertos de la mezcla y aumentar la profundidad de carbonatación.

Un estudio de Choi, Moon, Kim y Lachemi (2009), plantea la realización de probetas de morteros con un reemplazo porcentual de áridos finos por PET reciclado de un 0%, 25%, 50% ,75% y 100%. El cemento utilizado es portland común y el agregado fino complementario, arena de río. Se observa en los resultados que el flujo del mortero aumenta de forma lineal a medida que se aumenta el porcentaje de PET en la mezcla (véase Figura 4), esto se debe a que la forma redondeada de las partículas de PET y la textura de la superficie resbaladiza disminuye la fricción interna entre el mortero y el plástico, mientras que por otro lado, la resistencia a la compresión disminuye a medida que se aumenta el porcentaje de PET en la mezcla, en particular, se observa que para un reemplazo del 100% la resistencia disminuye en un 42% a una edad de 28 días.

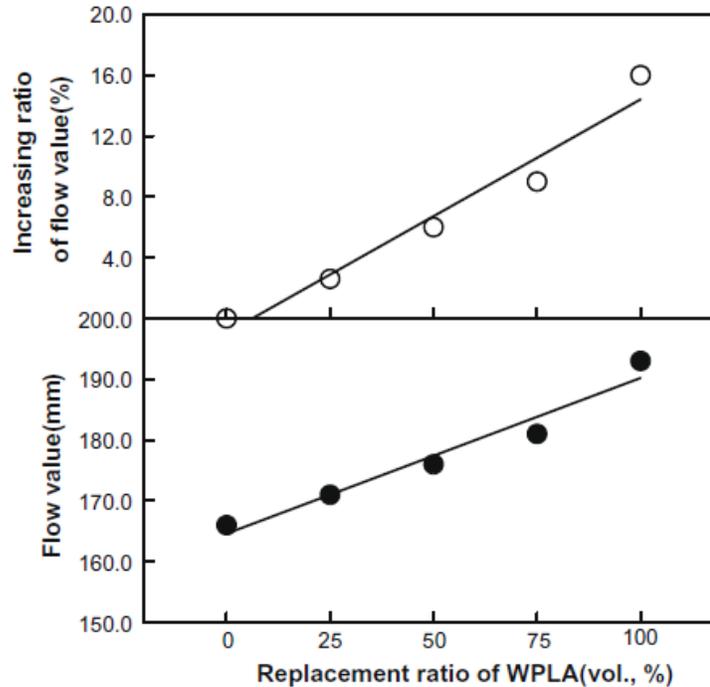


Figura 4: Flujo del mortero (Choi et al., 2009).

Rojas (2012), estudió la elaboración de morteros con agregados de PET reciclado (cuyo tamaño no superaba los 5 mm), como reemplazo de agregado fino en un 10%, 20%, 30%, 40% y 50%. El cemento utilizado era portland puzolánico y el agregado fino, arena. Con la mezcla se realizaron probetas que fueron ensayadas para verificar su resistencia a la compresión y tracción por flexión, obteniéndose como resultado que las resistencias anteriormente mencionadas disminuyen a medida que se aumente el porcentaje de plástico en la mezcla, por ejemplo, se observa que la resistencia a la flexión disminuye hasta en un 58% al compararla con la mezcla del mortero patrón cuando el reemplazo es de un 50% de agregado fino por PET, mientras que la resistencia a la compresión disminuye en un 71%.

Tabla 2: Propiedades mecánicas de los morteros.

Variable	Patrón	10% PET	20% PET	30% PET	40% PET	50% PET
Densidad [g/cm ³]	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9
Resistencia a la flexión [MPa]	9,32	7,66	6,74	5,47	4,34	3,87
Resistencia a la compresión [MPa]	55,39	48,24	37,41	34,35	22,44	16,10

Fuente: Rojas (2012).

2.2.2. Pavimentos

El uso del PET en pavimentos tiene la misma base de los morteros, es decir, de reemplazar un porcentaje de áridos por el plástico reciclado triturado. Para ello, los porcentajes de reemplazo varían según el autor y es que según lo indica Berrío (2017) la influencia del tamaño del PET como de la dosificación para estimar un porcentaje óptimo de reemplazo no se pueden evaluar de forma independiente. De esta forma se definió un esquema en el que para tamaños pequeños de PET (0,5-2,0 mm) se presentan porcentajes óptimos de adición, cuya estabilidad decrece en la medida en que se aumenta o disminuye la dosificación, mientras que para tamaños de PET más grandes (5,0 mm) presentan una reducción de la estabilidad en la mezcla a medida que aumentaba la cantidad de plástico adicionada. En dicho estudio se concluyó que para una mezcla de asfalto con tamaño del agregado de PET entre los 0,5-2,0 mm como reemplazo al 1%, se mejora el módulo resiliente³ en un 37% y la velocidad de deformación plástica presenta una disminución del 42%, lo cual quiere decir que es menos susceptible a fenómenos como el ahuellamiento y que puede recuperarse más fácilmente de las deflexiones causadas por el tránsito. (p.99-100)

Arteaga (2018) establece una relación entre el cemento y el porcentaje de reemplazo de áridos por PET reciclado tipo escama con el fin de minimizar el cemento utilizado y maximizar el PET. En este estudio se encontró para una cantidad de PET adicionado en torno al 2% se requiere un porcentaje de cemento de alrededor del 3,33%, para obtener un material con una resistencia a la compresión dentro de los parámetros mínimos exigidos por la normativa. (pp. 84-85)

Rahman y Wahab (2013), realizan por otro lado, un reemplazo en los áridos de asfalto por PET reciclado en porcentajes que varían desde el 5 al 25% en la mezcla. El material utilizado tenía un tamaño que iba desde los 3,35 mm a los 14mm. Los resultados mostrados por el ensayo indican que a medida que se aumenta el porcentaje de PET en la mezcla el módulo de resiliencia disminuye, por tanto, adicionar este elemento no mejora la rigidez del asfalto. Por otro lado, también se estudió el efecto de 1800 ciclos con 100 kPa sobre el asfalto con y sin PET, el resultado indicó que el asfalto con PET mejora la deformación permanente del asfalto, siendo la mezcla con un reemplazo del 20% la más baja en cuanto a deformaciones y que pareciera ser capaz de resistir mejor la deformación permanente de la carretera.

Cabe destacar que en este último estudio se tomó en cuenta un rango más amplio en cuanto a tamaño del PET reciclado, por lo que los valores pueden variar con respecto a otros estudios, además de considerar diferentes materiales como betún, cemento, condiciones ambientales, entre otros.

³ El módulo de resiliencia es la energía de deformación por unidad de volumen que se requiere para deformar un material hasta su límite elástico. El ensayo describe el comportamiento del material bajo cargas dinámicas de ruedas y como respuesta el pavimento sufre una deflexión.

2.2.3. Ladrillos

La elaboración de ladrillos con PET reciclado por Gaggino (2008) se basa en el uso de envases de PET triturados con un molino especial, sin la necesidad de un lavado previo o de sacarle etiquetas o tapas a las botellas y que luego son incorporados a una mezcla con cemento. El procedimiento constructivo es similar al del mortero, pero reemplazando los áridos por plástico reciclado, esta mezcla es vertida en una máquina para fabricar ladrillos, en una maquina bloquera, o en moldes de tipo manual. En ellos se realiza una compactación mecánica o manual y luego se desmoldan los elementos constructivos que deben ser curados con agua en forma de lluvia fina o bien sumergidos en agua. Posterior a veintiocho días este material puede ser utilizado en obra.

Las características de este ladrillo con respecto a uno convencional varían en su peso específico, ya que el primero es más liviano al tener PET reciclado en vez de áridos convencionales; mejora la aislación térmica, poseen una resistencia mecánica menor que uno convencional, pero suficiente para ser utilizado como cerramiento de viviendas con estructuras independientes antisísmicas; poseen una absorción de agua similar al ladrillo normal; una vez envejecido el material se observó que la resistencia a la compresión se reduce en un 25%; tiene buena resistencia al fuego y tiene una mejor resistencia acústica que el material convencional.

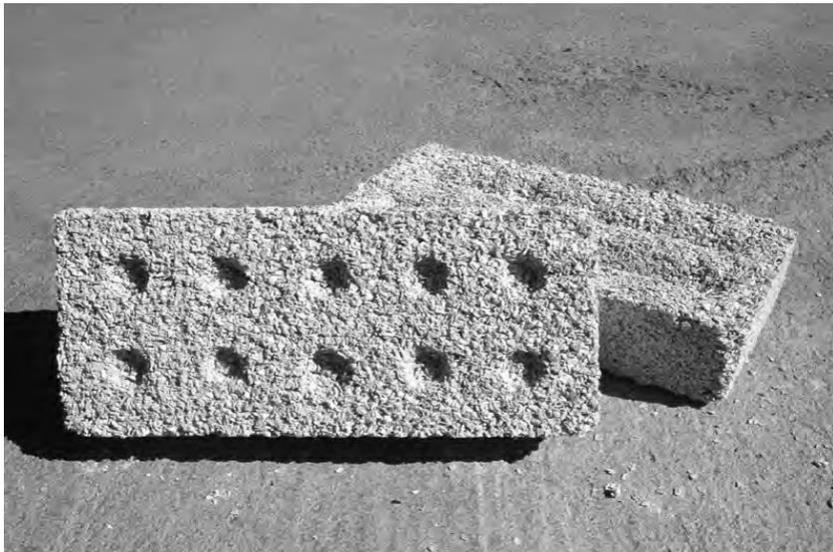


Figura 5: Ladrillo prefabricado con plástico reciclado (Gaggino, 2008).

2.2.4. Otros ejemplos de interés

- Uso del PET como material de relleno para nivelación de viviendas

Otro de los usos que puede tener el PET reciclado en la construcción es como material de relleno en áreas extensas que vayan a ser utilizadas para construcción de viviendas livianas como se analiza en el estudio de Botero, Muñoz, Ossa, Romo (2014).

A diferencia de los otros ejemplos presentados anteriormente, en este caso las botellas de PET se usan de manera completa (véase Figura 6), estudiándose, por ejemplo, la resistencia a la compresión de los envases de agua, agua mineral y bebidas carbonatadas, dando cuenta que estas dos últimas presentan una mayor resistencia, probablemente, relacionada por un mayor espesor en las paredes.

En el ensayo mencionado se observó que mientras la tapa del envase conserve su integridad al momento del ensayo, el envase seguirá deformándose sin incremento de la fuerza axial aplicada y esta tendencia continúa hasta que se alcance la falla de la pared del envase o se presente colapso de la tapa.

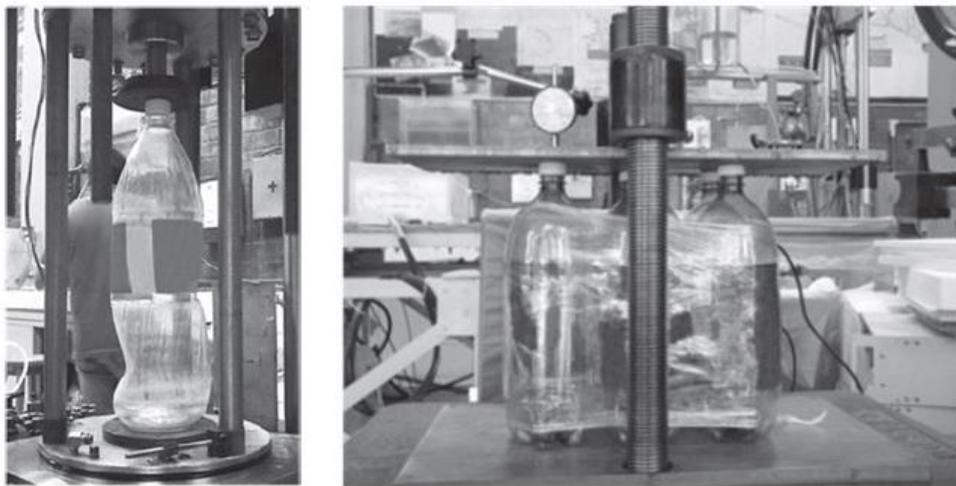


Figura 6: Ensayos de resistencia a la compresión para envases de PET. (Izq) Disposición individual. (Der) Disposición Grupal (Botero et al., 2014).

Otra variable estudiada es la utilización de “ecoladrillos” o bien, el uso de los envases PET, pero rellenos de bolsas de polietileno. A estos se le realizan ensayos de resistencia a la compresión y deformación, observándose que los envases rellenos obtienen un incremento en su resistencia a la compresión entre un 14 y un 140%. Sin embargo, también aumenta la deformación máxima, pero para efectos de deformaciones de falla, estas son bajas y se considera aceptable para el caso en que se utilice como material de relleno sobre la cual se construirán estructuras ligeras.

Finalmente, otro de los ensayos requeridos para estos envases es el de creep o fluencia lenta, para observar el fenómeno asociado a la deformación que presentara el material a través del tiempo luego de ser sometido a una carga constante. Este tipo de ensayo es necesario para garantizar una deformación uniforme de los envases y así evitar asentamientos diferenciales.

- Uso del PET para la fabricación de madera plástica

Un estudio realizado por García, Amado, Casados, Brito (2013), se enfoca en la utilización del PET reciclado, mezclado con paja de trigo para la fabricación de madera plástica. En él, se observa el aprovechamiento de estos dos materiales mencionados anteriormente y que generan gran cantidad de desechos en ciudades de México. La metodología de este estudio se basó en el acopio de botellas de PET (separadas y lavadas con anterioridad) y de trigo, el cual una vez molido, se cernía y luego se clasificaba en diferentes tamaños para la realización de probetas.

Los ensayos se enfocaron en pruebas de resistencia al impacto y dureza del material compuesto establecidos en la norma ASTM. Los resultados obtenidos mostraron que:

“para los diferentes tamaños de las mallas, al incrementar el porcentaje de paja se obtiene mayor resistencia al impacto, sin embargo, con 40% de paja la mezcla muestra muchos problemas de procesabilidad y no fue posible realizar esta combinación”.

En este mismo contexto y a modo resumen se vio que al incrementar el porcentaje de paja se mejora la resistencia al impacto, se dificulta el mezclado en el extrusor, aumenta la cantidad de vapores emitidos durante el mezclado y moldeado y se quema con mayor facilidad la paja. Cabe destacarse que al incorporar polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) a la mezcla se obtienen mejores resultados ya que se incrementa la energía de fractura, se reduce la fragilidad y facilita el proceso de mezclado. Finalmente, se infiere que el porcentaje óptimo de PET para la elaboración de este material es de un 30% y el tamaño de partícula para el trigo se encuentra limitada a la malla 14.

Se estipula también que:

“La madera plástica obtenida de estos dos materiales de desecho no presenta poros, se puede taladrar, lijar, pulir, cortar con sierra manual o eléctrica, puede utilizarse para la elaboración de tarimas industriales, mesas, sillas, libreros, escritorios, entre otros”.



Figura 7: Probetas de madera plástica para ensayos de impacto (García et al., 2013).

2.3. Normativa Nacional e Internacional

Actualmente, la producción de hormigones está regulada por la Norma Chilena 170 (NCh 170), que fue publicada el año 2016 y reemplazó a la misma cuya emisión se remite al año 1985. Esta norma establece los requisitos generales para hormigones usado en obras de construcción junto a sus diferentes componentes, como lo son el cemento, agregados, agua, entre otros. Entre los alcances de este documento, se disponen los requerimientos mínimos para la fabricación, transporte, colocación, compactación, curado, protección, desmolde y descimbre de hormigones cuya densidad va entre los 2000 kg/m^3 y los 2800 kg/m^3 , sin embargo, esta no especifica los requisitos de hormigones que requieran diseños o tecnologías especiales.

Entre los documentos que conforman la norma anterior, es necesario desglosar aquellas que serán de utilidad para el estudio y a su vez, relacionarla con su par dentro de los estándares dados por el American Society for Testing and Materials (ASTM International). Entre ellas se encuentran:

- ASTM C31/C31M-19a Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field

NCh1017 Of.2009, Hormigón – Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento

- ASTM C192/C192M-19 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory

NCh1018 Of.2009, Hormigón – Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio

- ASTM C143/C143M-20 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete

NCh1019 Of.2009, Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento del cono de Abrams

- ASTM C39/C39M-20 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

NCh1037 Of.2009, Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas

- ASTM C78/C78M-18 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)

NCh1038 Of.2009, Hormigón – Ensayo de tracción por flexión

- ASTM C138/C138M-17a Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete

NCh1564 Of.2009, Hormigón – Determinación de la densidad aparente del hormigón fresco

NCh1789 Of.1986, Hormigón – Determinación de la uniformidad obtenida en el mezclado del hormigón fresco

- ASTM C231/C231M-17a Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method

NCh2184 Of.1992, Hormigón y mortero – Determinación del contenido de aire

- ASTM C1585-13 Estándar Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes

NCh2262 Of.2009, Hormigón y mortero - Determinación de la permeabilidad al agua – Método de la penetración de agua bajo presión

La norma NCh163 Of.2013 – Áridos para morteros y hormigones – Requisitos, también debe ser desglosada, ya que si bien, se debe ocupar para el estudio de áridos gruesos y finos, en ella no se contempla los requisitos específicos aplicables a áridos especiales como áridos reciclables, artificiales, pesados y livianos.

El uso de áridos reciclados en países como España, Alemania, Portugal o Brasil ha facilitado su legislación, aunque no todos ellos contemplan los mismos parámetros de evaluación para dichos áridos (Dhir, Paine y Brito, 2011), tal como se puede observar en las Tablas 3 y 4. Se debe entender como árido reciclado un árido resultante del tratamiento de material previamente utilizado en la construcción, y que normalmente está compuesto por escombros de hormigón (RCA), albañilería (RMA) o de estos dos materiales en conjunto (MRA).

El uso de plásticos como árido no se encuentra en normativas nacionales ni internacionales de forma explícita, e incluso, en varias normas se entiende el agregado de plástico, cerámica, vidrio o madera como un contaminante en la mezcla de hormigón cuando se utiliza áridos reciclados (Dhir et al., 2011).

Tabla 3: Descripción general de la composición de áridos reciclados.

Normativa	Clasificación	Composición, % máximo de contenido				
		Concreto	Albañilería	Material orgánico	Contaminantes	Material ligero
Suiza [NBR 15.116]	RCA	<100	-	n.a	1 ^a	n.a
	MRA	<100	-	n.a	1	n.a
Alemania [DIN 4226-100]	RCA	>90	<10	n.a	1 ^b	n.a
	RCA	>70	<30	n.a	1 ^b	n.a
	RMA	<20	>80	n.a	1 ^b	n.a
	MRA	>80		n.a	n.a	n.a
HongKong [WBTC No.12/2002]	RCA	<100		n.a	1	0,5
Portugal [LNEC E471]	RCA	>90	<10	0,2		1
	RCA	>70	<30	0,5		1
	MRA	>90		2		1
Reino Unido [BS 8500-1]	MRA	n.a		1 ^b		1
	RCA	>95	<5	1 ^b		0,5

a: Incluye ladrillos, cerámica, vidrio, yeso, plástico y madera.

b: No incluye asfalto.

n.a: Información no disponible

Fuente: Dhir et al. (2011).

Tabla 4: Descripción general de los requisitos de áridos reciclados.

Normativa	Clasificación	Densidad mínima [kg/m ³]	Máxima absorción de agua [%]	Contenido máximo de Cloruros [%]	Contenido máximo de Sulfatos [%]
Suiza [NBR 15.116]	RCA	n.a	n.a	0,03	1
	MRA	n.a	n.a	n.a	1
Alemania [DIN 4226-100]	RCA	2000	10	0,04	0,8
	RCA	2000	15	0,04	0,8
	RMA	1800	20	0,04	0,8
	MRA	1500	n.a	0,15	n.a
HongKong [WBTC No.12/2002]	RCA	2000	10	0,05	1
Portugal [LNEC E471]	RCA	2200	7	a.i	0,8
	RCA	2200	7	a.i	0,8
	MRA	2000	7	a.i	0,8
Reino Unido [BS 8500-1]	MRA	n.a	n.a	n.a	1
	RCA	n.a	n.a	n.a	n.a

a.i: Información adicional proporcionado por la entidad respectiva

n.a: Información no disponible

Fuente: Dhir et al. (2011).

La Normativa Europea EN-12620:2003 + A1 2009, por otro lado, si contempla el uso de áridos artificiales y reciclados que posean una densidad aparente igual o superior a los 2000 kg/m³ y en caso de que el árido sea liviano (su densidad de partículas sea menor a los 2000 kg/m³), se puede utilizar la UNE-EN 13055-1, que corresponde a la primera parte de la norma para áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado.

Se procederá entonces, a tener como referencia las siguientes normas europeas para clasificar propiedades del PET en su uso como reemplazo de áridos finos, asociando la normativa chilena respectiva.

- UNE-EN 933-1:2012 Ensayos para determinar las características geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría. Método de tamizado.

NCh165 Of.2009, Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría.

- UNE-EN 1097- 3:2014 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad.

NCh1116 Of.2008, Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente

- UNE-EN 1097-6:2000 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.

NCh1239 Of.2009, Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas

NCh117 Of.2010, Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades reales y neta y la absorción de agua de las gravas

- UNE-EN 1744-1 + A1:2013 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico.

NCh1444 Of.2010, Áridos para morteros y hormigones – Determinación de cloruros y sulfatos

Capítulo 3

3. Hormigón con PET reciclado

3.1. Experiencias previas

A través del tiempo varios han sido los estudios sobre la incorporación de plástico reciclado en la fabricación de hormigones. Gu y Ozbakkaloglu (2016) realizaron una revisión de 83 investigaciones que van desde el año 1993 hasta el año 2014, donde se utilizan diferentes tipos de residuos plásticos como polipropileno (PP), poliestireno expandido (EPS), polietileno de alta densidad (HDPE), tereftalato de polietileno (PET) entre otros, como parte de la mezcla de hormigones convencionales, livianos y morteros.

El uso de PET reciclado se utiliza como reemplazo parcial de áridos finos y como adición en diferentes mezclas de concreto. Los estudios asociados a este material en particular y que abarca la presente investigación, parten desde Choi, Moon, Chung y Cho (2005), hasta el estudio realizado por Infante y Valderrama (2019). En total unos veinte ocho artículos divididos en mezclas para hormigones geo polímeros, livianos, morteros y hormigones convencionales (véase Figura 8), siendo sólo estos últimos analizados en profundidad para llegar a un nivel óptimo de reemplazo de áridos finos por PET reciclado junto con las variables necesarias a considerar.

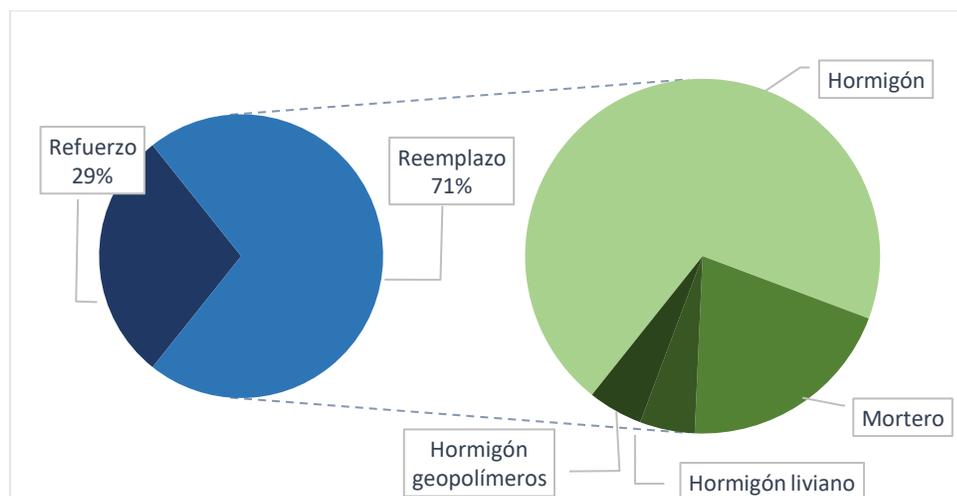


Figura 8: Distribución de artículos según el tipo de uso del PET reciclado y mezcla realizada.

A continuación, se expondrán las principales características y conclusiones de las investigaciones estudiadas.

Choi et al. (2005) realizaron probetas que contenían 25%, 50% y 75% de reemplazo de áridos finos por PET y de forma adicional, utilizaron escoria de alto horno y variaron la relación agua-cemento entre 0,45 y 0,53 para observar cómo cambiaban las propiedades del concreto al compararlo con otro sin plástico reciclado y sin escoria. Dentro de las principales conclusiones se destaca que la resistencia a la compresión disminuye a medida que aumentaba la relación agua-cemento, siendo la mezcla con un 75% de reemplazo la que presentaría la menor resistencia al comparada con la mezcla de control, es decir, una reducción cercana al 21%, además de reducirse la densidad del concreto final debido a que la densidad de la arena es mayor a la densidad del PET reciclado.

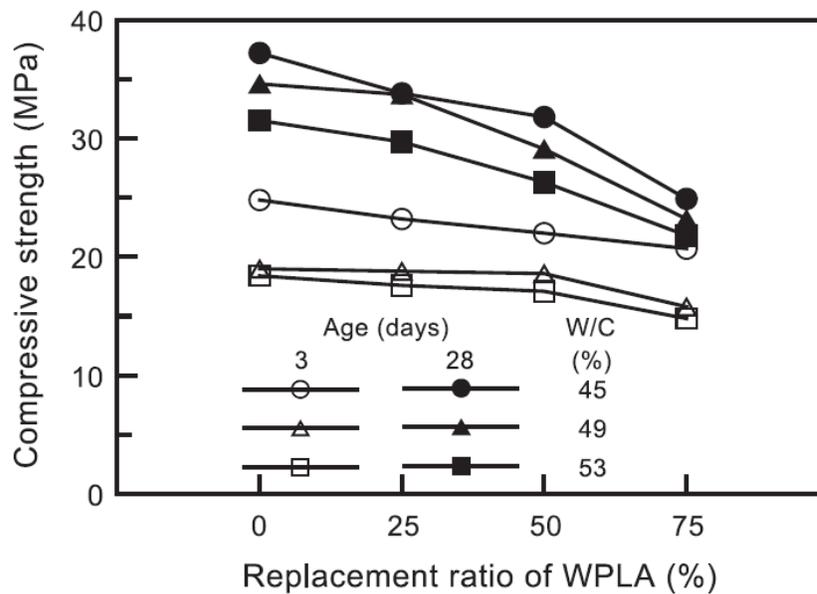


Figura 9: Relación entre resistencia a la compresión y porcentaje de residuos plásticos reciclado (Choi et al., 2005).

Posteriormente, Choi et al. (2009) realizaron mezclas con el mismo porcentaje de reemplazo y relación agua-cemento utilizados en el estudio del 2005, sin embargo, esta vez no se utilizaría escoria de alto horno. Se obtuvo como resultado, una confirmación de que la fluidez del concreto no varía con respecto a la relación agua cemento, pero aumenta de manera proporcional a la cantidad de plástico en la mezcla, debido probablemente a la forma redondeada del PET agregado y que su absorción de agua era cero. Además, se observó que la resistencia a la compresión disminuye a medida que aumenta la cantidad de PET, específicamente en un 6%, 16% y 30% cuando se utiliza 25%, 50% y 75% de plástico reciclado como arena.

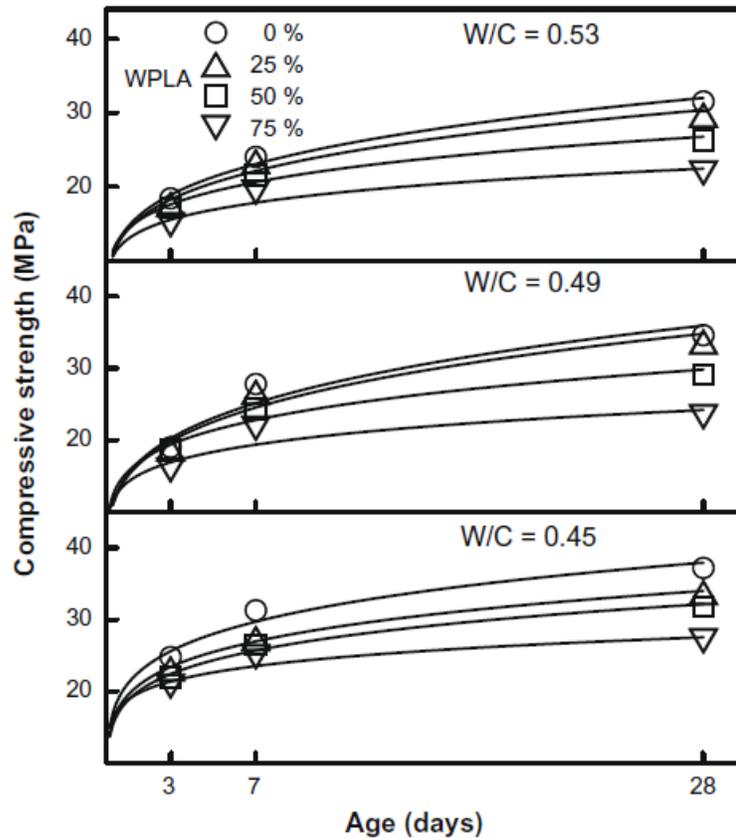


Figura 10: Resistencia a la compresión del concreto (Choi et al., 2009).

Albano, Camacho, Hernández, Matheus y Gutiérrez (2009), estudiaron la influencia del uso de partículas de PET reciclado como remplazo parcial de áridos finos en un 10% y un 20%, además de variar la relación A/C (tomando valores como 0,5 y 0,6) para ver el comportamiento del hormigón. El plástico utilizado había recibido un tratamiento especial mediante calor obteniéndose partículas de 0,26 y 1,14 cm. Los resultados obtenidos apuntan a una reducción de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, dado que el aumento de PET en la mezcla produce problemas en la trabajabilidad, lo que se ve reflejado en un aumento de poros y, por ende, una reducción en la resistencia y un aumento en la absorción de agua. Sin embargo, se presentaban buenas propiedades a la flexión, a la resistencia frente a cargas de fuego y la velocidad del pulso ultrasónico se atenúa por la porosidad presentada.

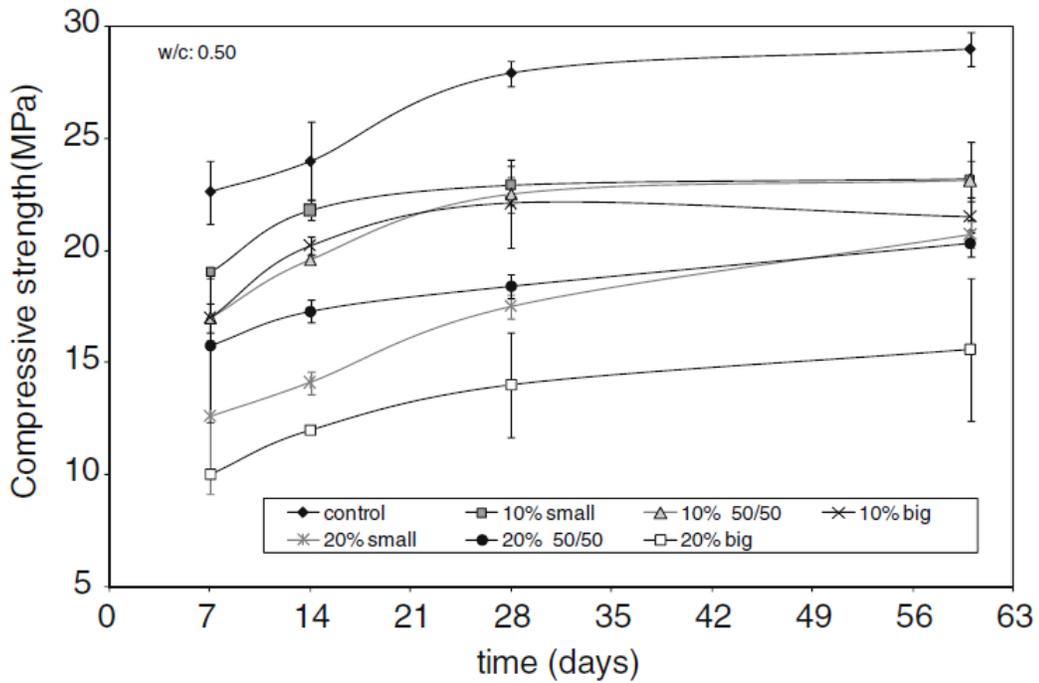


Figura 11: Resistencia a la compresión de mezclas de concreto y PET versus edad de curado a una relación A/C de 0,5 (Albano et al., 2009).

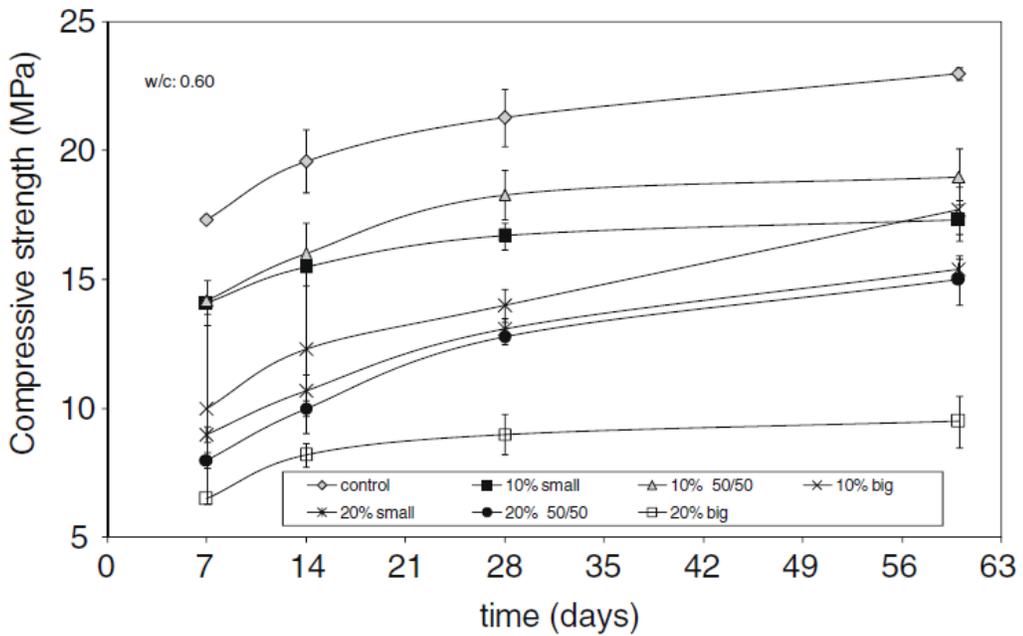


Figura 12: Resistencia a la compresión de mezclas de concreto y PET versus edad de curado a una relación A/C de 0,6 (Albano et al., 2009).

Frigione (2010) realizó un reemplazo del 5% de PET reciclado por arena en la mezcla de hormigones, variando la relación agua-cemento y analizando su comportamiento mecánico a los 28 y 365 días. Una de las peculiaridades de este ensayo es que las partículas de plástico no se trataron antes de ser utilizadas. Dentro de las principales conclusiones de este estudio no se observan diferencias significativas en los valores de trabajabilidad de hormigones que poseen igual relación A/C, así como también, se observa que la resistencia a la compresión de mezclas que posean baja relación no difiere en gran medida con respecto a una muestra que no tenga PET como agregado, tanto a los 28 como a los 365 días. Esta diferencia si aumenta a medida que aumenta la relación de agua-cemento (0,55), debido probablemente a la segregación entre el plástico y la pasta de cemento hidratado lo que generaría porosidad.

Tabla 5: Resistencia a la compresión del concreto con un 5% de reemplazo de arena por PET reciclado.

<i>Mezcla</i>	<i>Resistencia a la Compresión [MPa]</i>	
	<i>A los 28 días</i>	<i>A los 365 días</i>
<i>Referencia A</i>	68,00	74,10
<i>Concreto A</i>	67,50	73,20
<i>Referencia B</i>	41,50	49,00
<i>Concreto B</i>	40,70	48,20
<i>Referencia C</i>	70,00	78,00
<i>Concreto C</i>	69,70	77,70
<i>Referencia D</i>	44,00	53,50
<i>Concreto D</i>	43,20	52,50

Fuente: Frigione (2010).

Galvão, Portella, Joukoski, Mendes y Ferreira (2011) realizaron mezclas con reemplazo de áridos finos por tiras de caucho, LDPE y PET reciclados. En este caso, el PET utilizado venía de envases de desodorante que fueron previamente limpiado triturado y aplastado, para luego ser incorporado en 0,5%, 1%, 2,5%, 5% y 7,5% respecto al volumen de la arena. Dentro de las principales conclusiones se observa un aumento en la resistencia a la compresión del concreto cuando no se utiliza más del 2,5% de plástico en la mezcla, también se observa que la trabajabilidad se comporta de manera inversamente proporcional a la adición de plástico pero que esta puede ser solucionada con el uso de aditivos. Finalmente, se percibe un aumento en la resistencia frente a la erosión-abrasión al compararlo con una muestra sin agregado PET.

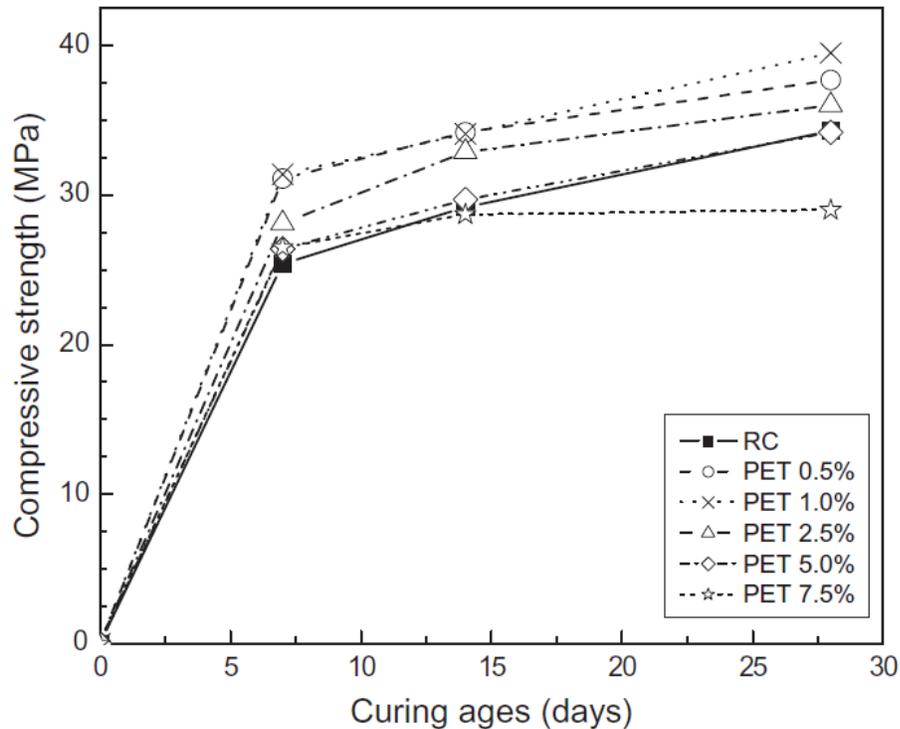


Figura 13: Resistencia a la compresión en términos de tiempo de curado para hormigones elaborados con PET reciclado (Galvão et al., 2011).

Pelisser, Klegues, Gleize y Ramos (2012) estudiaron el uso de PET reciclado como material adicional en los hormigones. Los resultados mostraron que al ser incluidos entre un 0,18% y 0,30% a la mezcla aumentan la resistencia a la flexión y la resistencia al impacto para una edad de 28 días, sin embargo, a los 150 días este aumento en la dureza no se presenta ya que las fibras de PET reciclado tienden a debilitarse y degradarse al estar en un ambiente alcalino. La resistencia a la compresión y el módulo de Young por otra parte no presenta variación en sus valores por la presencia de este plástico, no así, la resistencia a la tracción, la cual aumenta a medida que aumente la cantidad de PET.

Tabla 6: Propiedades mecánicas de los hormigones.

Edad (días)	Contenido de Fibra, 20 mm (volumen %)	Resistencia a la Compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la Flexión (MPa)
28	0	29,23 ± 1,4	24,93 ± 3,5	3,75 ± 0,04
	0,05	28,35 ± 0,5	25,05 ± 1,1	4,30 ± 0,17
	0,18	27,04 ± 1,1	22,92 ± 0,9	4,26 ± 0,28
	0,30	29,52 ± 0,6	24,20 ± 1,4	4,47 ± 0,28
150	0	32,23 ± 0,3	27,15 ± 2,1	-
	0,05	32,52 ± 0,2	26,36 ± 0,2	4,67 ± 0,24
	0,18	29,10 ± 2,9	25,90 ± 1,8	4,61 ± 0,17
	0,30	29,69 ± 2,0	27,31 ± 0,9	4,48 ± 0,01

Fuente: Polisser et al., (2012).

Ramadevi y Manju (2012) realizaron estudios sobre reemplazo en pequeñas proporciones, las cuales variaban entre 0,5% y 6%. El diseño final era la elaboración de un hormigón

grado 25 (según normativa de India⁴) y los ensayos realizados fueron de resistencia a la compresión, flexión y tracción luego de 7 y 28 días. Como conclusión general del estudio se obtuvo que para un reemplazo del 2% se obtiene una mejora con respecto al prototipo sin inclusión de PET para todos los ensayos realizados, sin embargo, es posible inferir de los resultados obtenidos que se podría utilizar una mayor cantidad de PET en la mezcla, dado que los resultados experimentan un peak en cuanto a resistencia teniendo en la cima de esta las probetas con la mezcla antes mencionada, no obstante, se aprecia que para una inclusión del 6% de PET la resistencia sigue siendo mayor en comparación a la mezcla convencional de hormigón tanto a tracción, compresión y flexión, siendo el primero de ellos el único que no experimenta un peak, sino que, aumenta de forma gradual.

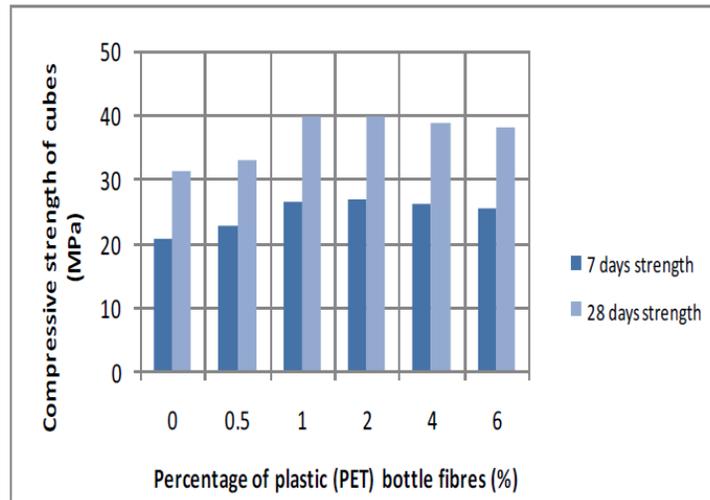


Figura 14: Resistencia a la compresión vs fibra plástica (%) (Ramadevi y Manju, 2012).

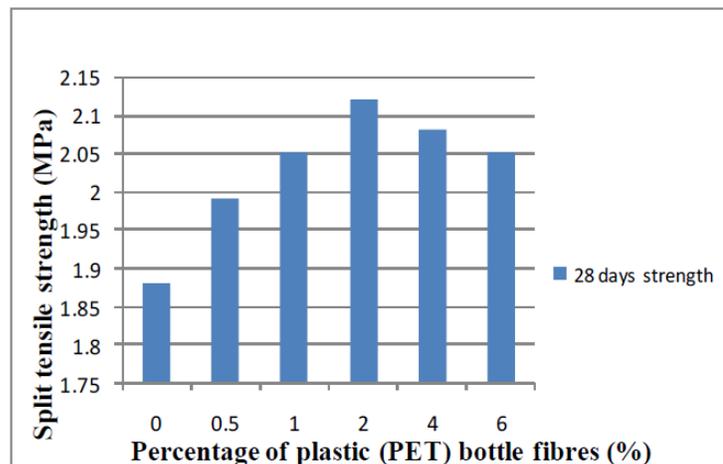


Figura 15: Resistencia a la tracción vs fibra plástica (%) (Ramadevi y Manju, 2012).

⁴ Resistencia de 25 MPa a la compresión mediante probetas cúbicas, evaluado a los 28 días.

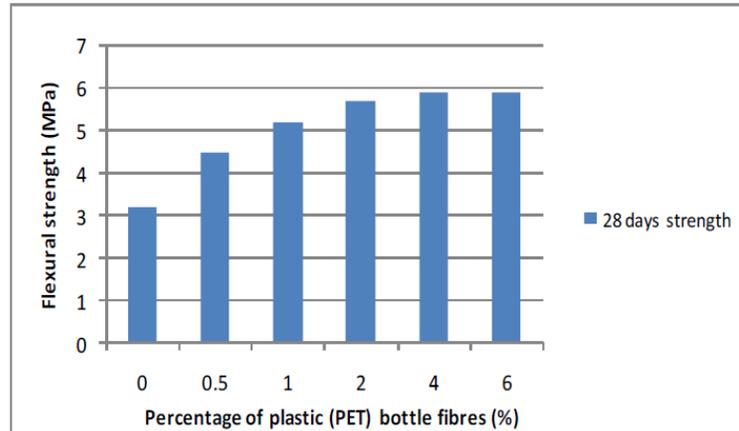


Figura 16: Resistencia a la flexión vs fibra plástica (%) (Ramadevi y Manju, 2012).

Ferreira, de Brito y Saikia (2012) realizaron mezclas de hormigón con agregado PET como reemplazo de arena en un 7,5% y un 15%, además de utilizar el particulado de plástico en diferentes formas y tamaños, curaron las muestras bajo tres ambientes diferentes los cuales describieron como condiciones de obra (OEC), laboratorio (LCC) y cámara húmeda (WCC). Las partículas de plástico se distribuyeron en tres formatos: partículas gruesas irregulares (PC), partículas finas irregulares (PF) y partículas cilíndricas regulares (PP) las cuales tuvieron un tratamiento previo para obtener su forma (véase Figura 17). En este caso la resistencia objetivo era de 30 MPa a la compresión utilizando probetas cúbicas y un asentamiento de 13 cm. Dentro de las principales conclusiones se destaca que independiente del ambiente en que se encuentre el hormigón y el tamaño del agrega PET que se utilice, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad baja, sin embargo, se destaca que las partículas PP presentaron el mejor resultado. Así mismo, se vio que el porcentaje de reemplazo junto con el tipo de curado no afecta en gran medida la resistencia, como si lo hace la relación agua-cemento. Finalmente se observa que el desgaste por abrasión disminuía a medida que se aumentaba el porcentaje de PET incorporado a la mezcla.

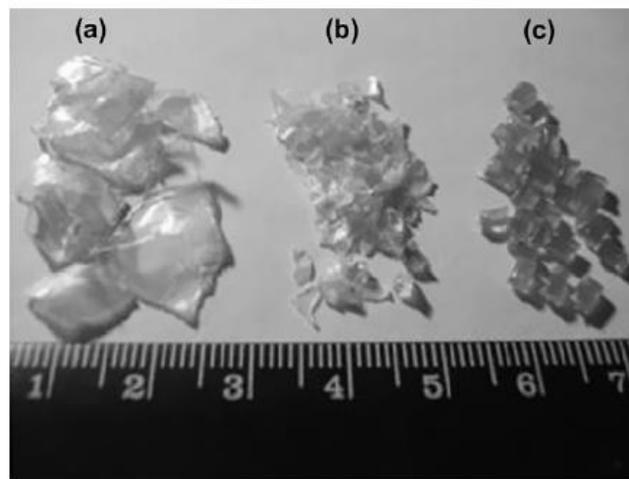


Figura 17: Tipos de plásticos utilizados para el programa experimental (a) PC, (b) PF y (c) PP.

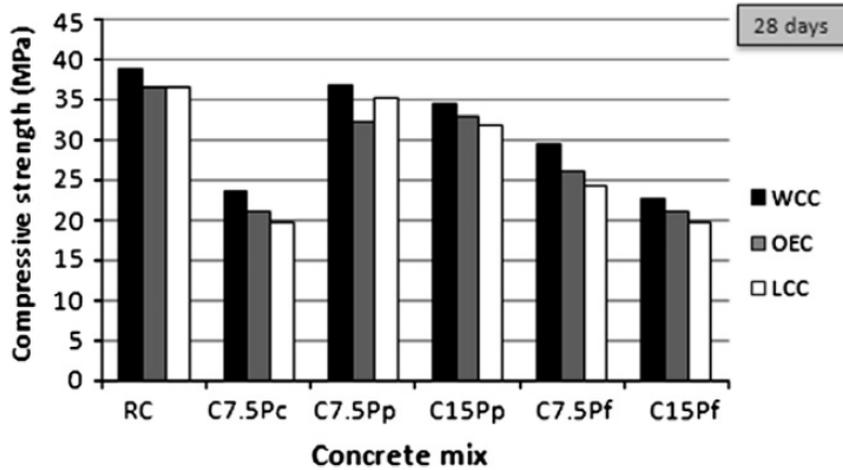


Figura 18: Resultados de resistencia a la compresión según las diferentes condiciones de curado a los 28 días (Ferreira et al., 2012).

Silva, de Brito y Saikia (2013) realizaron un estudio bajo el mismo formato que Ferreira et al., (2012), es decir, usaron un reemplazo del 7,5% y 15% de agregados PET por arena, con formatos PP, PC y PF, en mezclas que fueron curadas bajo diferentes ambientes (OEC, LCC y WCC). Debido a los problemas de trabajabilidad que presentan los agregados de plásticos según se forma y tamaño se varía la relación agua-cemento para obtener un asentamiento de 13 cm \pm 1,5 cm. Dentro de las principales conclusiones se destaca que la trabajabilidad disminuye a medida que se aumenta agregado plástico grueso e irregular, así como también disminuye la densidad del concreto. A medida que se aumenta la sustitución de agregados naturales por agregados de PET, la absorción de agua por inmersión aumenta, al igual que la capilaridad, así mismo, se observó que los hormigones con agregado plástico presentaron mayores profundidades a la carbonatación y penetración de cloruros.

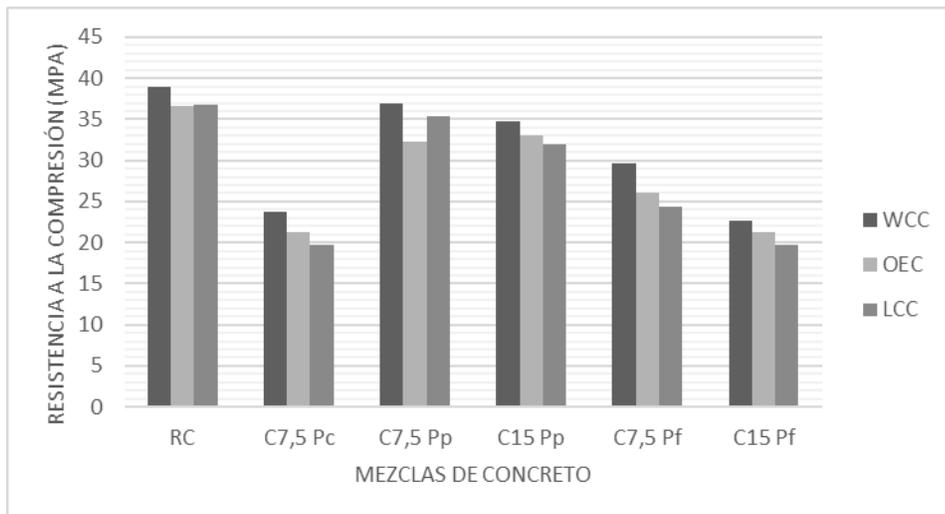


Figura 19: Resultados de resistencia a la compresión según las diferentes condiciones de curado a los 28 días (Elaboración propia a partir de los datos de Silva et al., 2013).

Posteriormente, Saikia y de Brito (2014) siguieron la línea de sus estudios anteriores y de igual forma utilizaron agregados PET en los formatos PP, PC y PF como sustitución de agregados naturales en proporciones del 5%, 10% y 15%. En este caso, la relación agua-cemento también variaba en busca de obtener un asentamiento de $12,5 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$. Las principales conclusiones del estudio indican que el tamaño y la forma del PET, pueden aumentar la necesidad de agua y también, disminuir el valor del asentamiento. Independiente del tipo del agregado y el tiempo de curado la resistencia a la compresión flexión y módulo de elasticidad disminuyen con respecto al hormigón de referencia, siendo la tendencia decreciente de estas propiedades organizada como $PP > PF > PC$. Finalmente se destaca que la resistencia a la abrasión del hormigón con agregado de plástico presenta mejores resultados que una mezcla convencional, siendo las mezclas de PP y PF con un 10% de PET las que presentan mejores resultados.

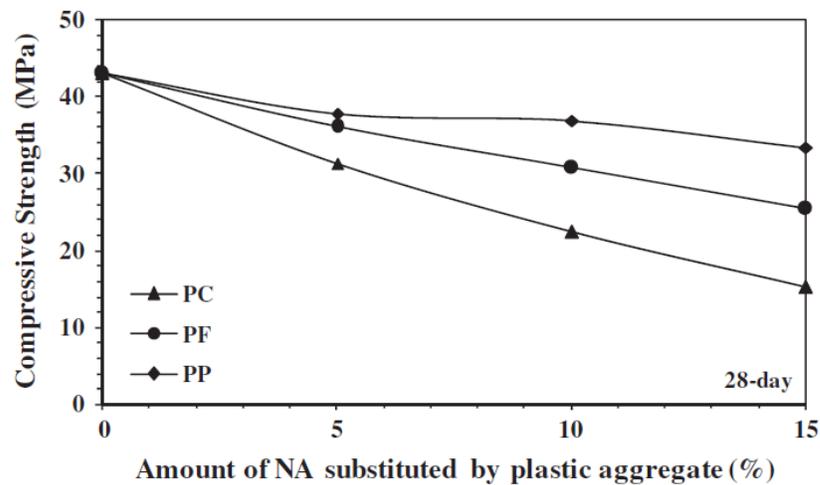


Figura 20: Resistencia a la compresión versus la incorporación de agregado PET como reemplazo de árido fino (Saikia y de Brito, 2014).

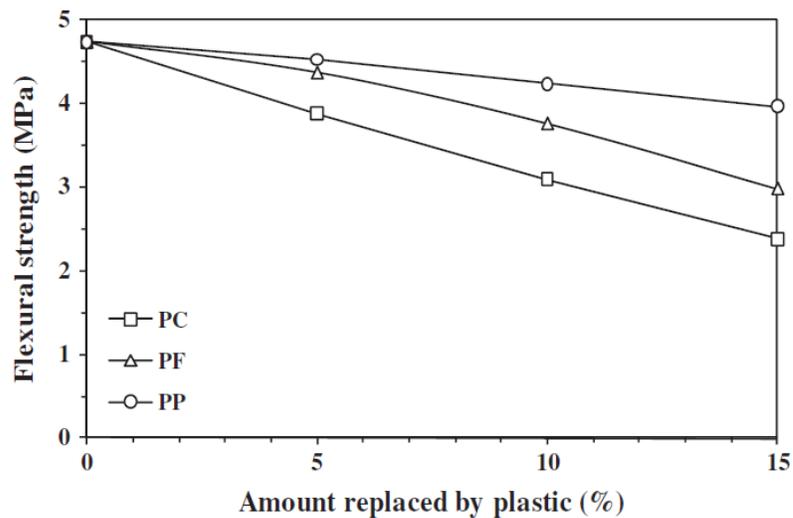


Figura 21: Resistencia a la compresión versus la incorporación de agregado PET como reemplazo de árido fino (Saikia y de Brito, 2014).

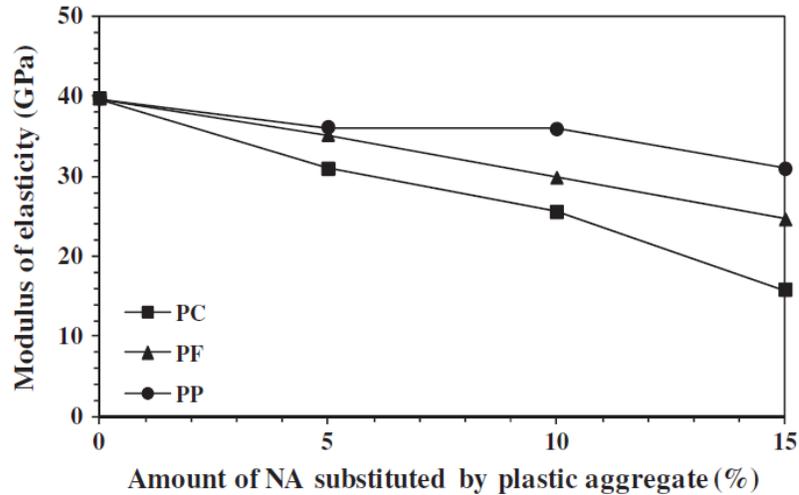


Figura 22: Influencia de varios de tipos de agregados de PET en el módulo de elasticidad en el hormigón (Saikia y de Brito, 2014).

Juki et al. (2013) realizaron un estudio donde se reemplazaba el árido fino por PET reciclado en proporciones del 25%, 50% y 75%. Entre los materiales se mencionan el uso de cemento portland común, agregado grueso de tamaño máximo 20 mm, agregado fino y PET que variaba su tamaño desde los 0,1 mm a los 5 mm. Dentro de las principales conclusiones se observa una reducción de la resistencia a la compresión, flexión y módulo de elasticidad.

Tabla 7: Resistencia a la compresión, flexión y módulo de elasticidad a los 28 días.

	<i>Compresión [MPa]</i>	<i>Flexión [MPa]</i>	<i>Módulo de elasticidad [GPa]</i>
0%	26,69	4,99	30,00
25%	22,83	4,75	23,00
50%	20,37	3,80	15,00
75%	15,20	2,61	9,00

Fuente: Juki et al. (2013)

Nibudey, Nagarnaik, Parbat y Pande (2013) estudiaron la resistencia de una mezcla de hormigón que contenía fibras de PET reciclado (en este caso no se utilizaron como sustituto, sino, como una adición). El objetivo era obtener un concreto que lograra una resistencia a la compresión de 20 y 30 MPa utilizando probetas cúbicas, y para ello ocuparon cemento portland puzolánico, un aditivo plastificante, arena, gravilla, una relación agua-cemento de 0,52 y 0,48 respectivamente, y las fibras de plástico reciclado que tendría dos tamaños denominados AR-35 y AR-50. Los datos obtenidos por los ensayos mostraron que para un hormigón grado 20 aumentaba en un 7,35% su resistencia a la compresión si es que utilizaba un 1% de fibra de PET, mientras que esta disminuye en un 27,07% si se utilizaba un 3%.

De manera particular se infiere que para ambos tipos de hormigones el aumento y la disminución de la resistencia son relativamente similares, siendo estos del 6%-7% y 26%-27% respectivamente. Finalmente se destaca que la ductilidad del concreto con plástico agregado mejora en comparación a uno convencional, debido al tipo de fallas que presentan las muestras.

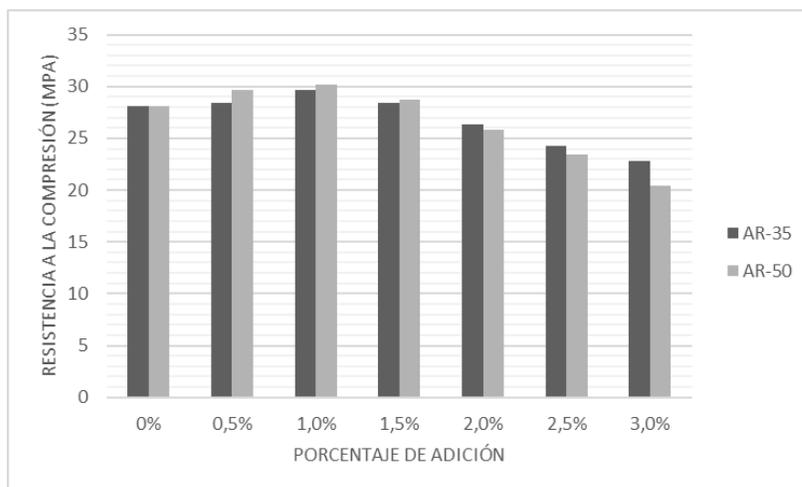


Figura 23: Resistencia a la compresión versus porcentaje de adición de PET reciclado, para un hormigón M20 (Elaboración propia a partir de los datos de Nibudey et al., 2013).

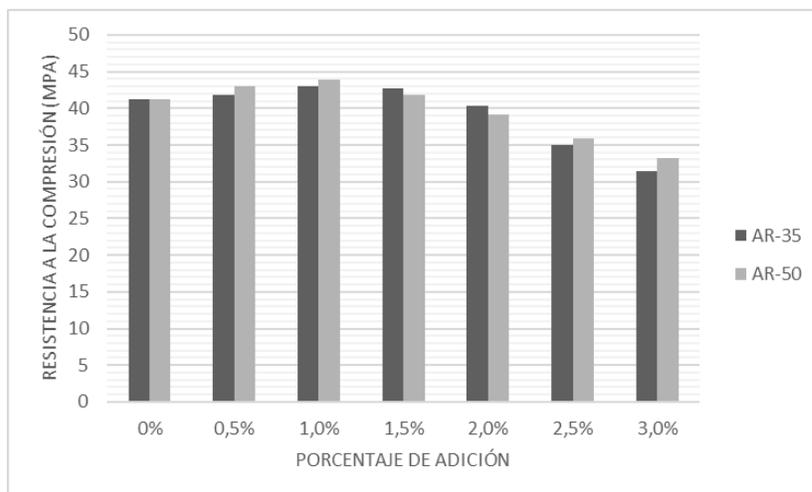


Figura 24 Resistencia a la compresión versus porcentaje de adición de PET reciclado, para un hormigón M30 (Elaboración propia a partir de los datos de Nibudey et al., 2013).

Khanna, Singla y Jain (2015) realizaron mezclas con un reemplazo de 10%, 20%, 30% y 40% de áridos finos por fibras plásticas de PET reciclado. Además, se utilizó ceniza volante en porcentajes de 0%, 5%, 10% y 15% con respecto al peso del cemento y un super plastificante (Conplast SP430 G8) para mejorar la trabajabilidad y para reducir la relación de agua cemento en la elaboración de un hormigón grado 30, es decir, que soporta 30 MPa a la compresión (utilizando probetas cúbicas).

Como principales conclusiones de estos ensayos se obtuvo una disminución continua de la resistencia a medida que se aumenta la cantidad de plástico en la mezcla. Este problema se atribuye a un enlace incorrecto entre la matriz de cemento y arena con las fibras de plástico, lo que produce un debilitamiento en la zona de transición entre el agregado y la pasta de cemento hidratado. La resistencia también se ve afectada por el aumento del contenido de cenizas volantes para un mismo contenido de plástico, dado que este material ralentiza el proceso de hidratación del cemento, sin embargo, se observó que para las probetas de 56 días dicha resistencia aumenta. Finalmente se obtuvo que un reemplazo parcial de hasta un 30% de áridos finos por PET, en conjunto con un 10% de ceniza volante pueden producir la mezcla M30 a la compresión.

Tabla 8: Resistencia a la compresión promedio (0% ceniza volante) N/mm^2 .

<i>Proporción de fibras plásticas</i>	0%	10%	20%	30%	40%
7 días	26,83	26,51	25,42	24,52	23,37
28 días	36,43	35,78	33,40	32,47	29,97
56 días	38,42	37,61	35,11	34,13	31,45

Fuente: Khanna, et al., (2015).

Tabla 9: Resistencia a la compresión promedio (5% ceniza volante) N/mm^2 .

<i>Proporción de fibras plásticas</i>	10%	20%	30%	40%
7 días	26,27	25,47	24,13	22,87
28 días	35,11	32,87	31,63	28,31
56 días	39,09	37,71	37,67	35,33

Fuente: Khanna, et al., (2015).

Tabla 10: Resistencia a la compresión promedio (10% ceniza volante) N/mm^2 .

<i>Proporción de fibras plásticas</i>	10%	20%	30%	40%
7 días	25,71	24,98	23,8	22,61
28 días	33,21	32,07	30,51	28,96
56 días	42,62	40,44	38,64	37,47

Fuente: Khanna, et al., (2015).

Tabla 11: Resistencia a la compresión promedio (15% ceniza volante) N/mm^2 .

<i>Proporción de fibras plásticas</i>	10%	20%	30%	40%
7 días	23,96	23,85	23,17	22,45
28 días	31,71	30,03	28,77	27,52
56 días	38,42	35,58	36,09	35,09

Fuente: Khanna, et al., (2015).

Vali y Assadi (2017) sustituyeron el árido fino por PET reciclado y triturado de forma porcentual en 0%, 5%, 10%, 15% y 20%. El cemento utilizado era portland común grado 53⁵ (clasificado según las normas de India), con el cual se dosificaron mezclas de hormigón para obtener resistencias de 20, 25 y 30 MPa a la compresión (utilizando probetas cúbicas se les denomina como M20, M25 y M30 en India)⁶ y se comparó la resistencia a la compresión y flexión que adquirieron las muestras luego de 7 y 28 días, observándose como conclusión principal que para todo grado de hormigón testado, la resistencia a la compresión aumenta cuando se utiliza hasta un 10% de PET como reemplazo, tal como se ve en las Figuras 25, 26 y 27.

Se observa adicionalmente, para la mezcla M30 una vez que se reemplaza más del 10% de áridos por PET, el hormigón ni siquiera alcanza la resistencia para la cual fue elaborado una vez transcurridos los 28 días.

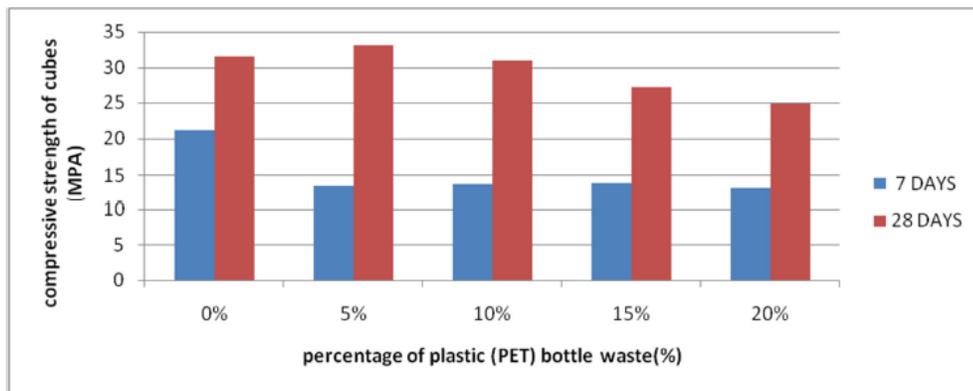


Figura 25: Resistencia a la compresión vs residuos plásticos (%) para grado M30 de hormigón (Vali y Assadi, 2017).

Por otro lado, se observa también que la resistencia a la compresión para las mezclas M25 y M20 disminuye con respecto a la probeta de muestra pasado la cantidad de reemplazo del 10%, sin embargo, esta no disminuye del mínimo establecido según sus especificaciones, obteniendo incluso mejores resultados a una edad temprana que la mezcla M30.

⁵ El cemento grado 53 es característico en la construcción de proyectos con hormigones pretensados, elementos prefabricados, caminos, puentes y otros trabajos donde se requiere elaborar hormigones con resistencia a la compresión de 20 MPa o superior. Este tipo de cemento puede ser comparado en términos de resistencia (a los 3, 7 y 28 días), por ejemplo, con el cemento de alta resistencia inicial Bío Bío, donde ambos alcanzan en promedio una resistencia de 52-53 MPa a la edad de 28 días.

⁶ Dichas resistencias se conocen en Chile como G16, G20 y G25 respectivamente (se realiza una conversión de probeta cúbica a cilíndrica con la cual se mide y clasifica la resistencia en el país).

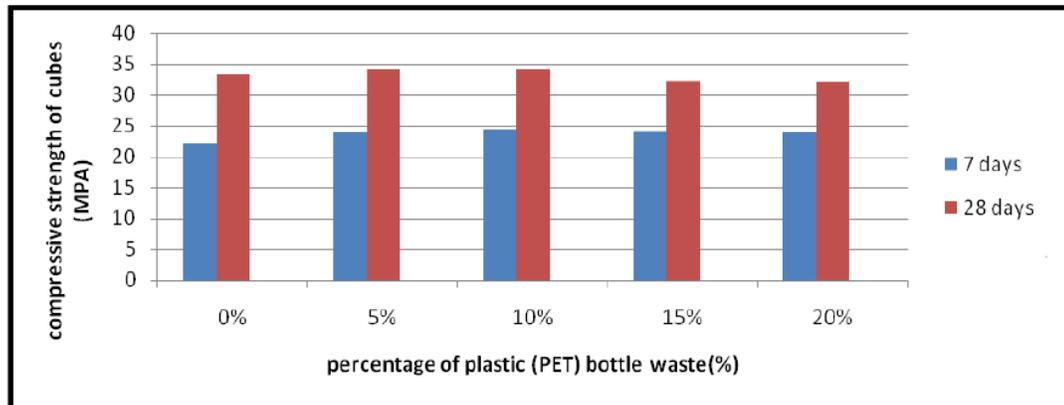


Figura 26: Resistencia a la compresión vs residuos plásticos (%) para grado M25 de hormigón (Vali y Assadi, 2017).

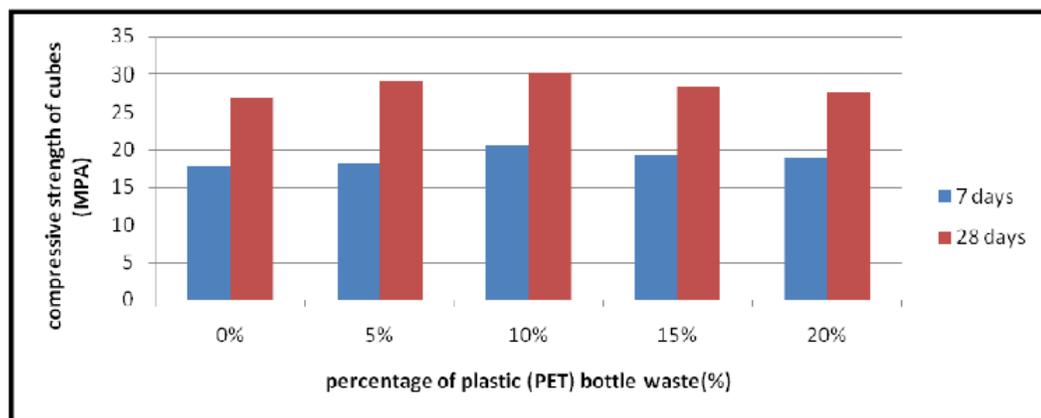


Figura 27: Resistencia a la compresión vs residuos plásticos (%) para grado M20 de hormigón (Vali y Assadi, 2017).

A medida que aumenta el porcentaje de plástico en la mezcla, también disminuye la resistencia a la flexión, tal como se muestra en las Figuras 28, 29 y 30. El punto de inflexión también ocurre cuando el nivel de reemplazo es del 10%, siendo el hormigón M30 el que disminuye en mayor medida su resistencia pasado este porcentaje, mientras que las mezclas M25 y M20 presentan incluso una resistencia a la flexión mayor que la muestra de referencia.

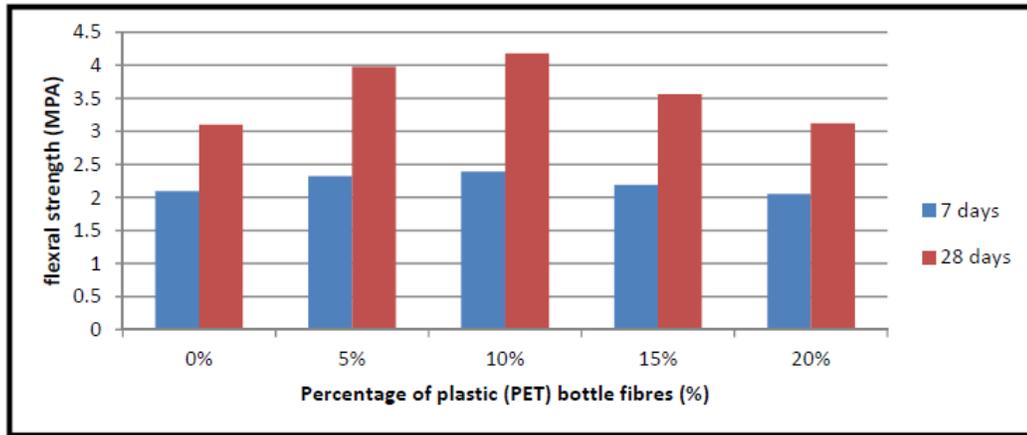


Figura 28: Resistencia a la flexión vs residuos plásticos (%) para grado M30 de hormigón (Vali y Assadi, 2017).

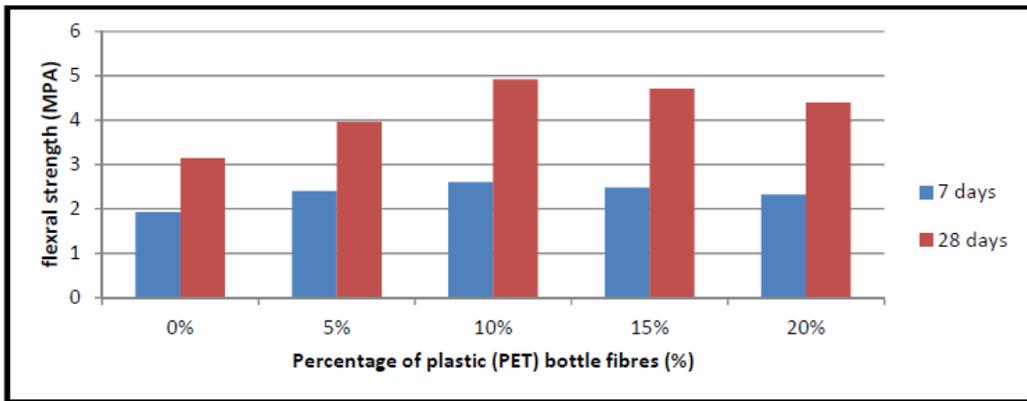


Figura 29: Resistencia a la flexión vs residuos plásticos (%) para grado M25 de hormigón (Vali y Assadi, 2017).

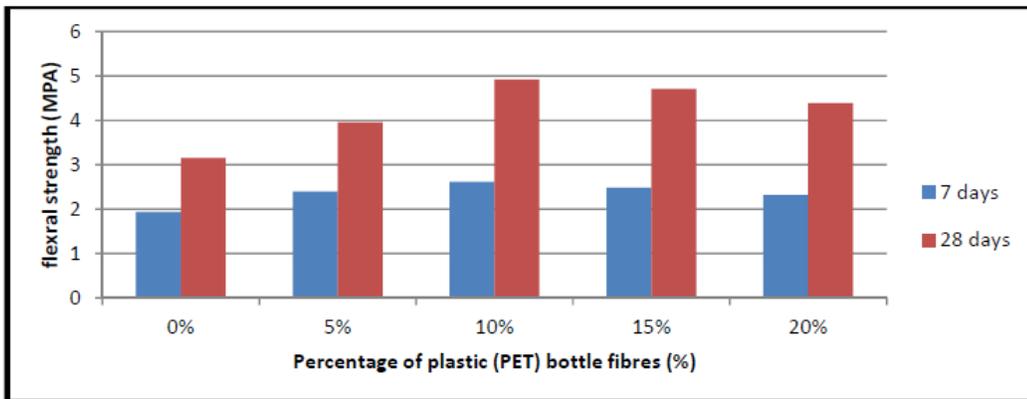


Figura 30: Resistencia a la flexión vs residuos plásticos (%) para grado M20 de hormigón (Vali y Assadi, 2017).

Beltran y Ferreira (2018) realizaron bloques de hormigón H15⁷ convencional de uso estructural, con un reemplazo más reducido de PET reciclado por agregados finos, estos porcentajes eran del 1%, 3%, 5% y 7%. El tamaño del plástico era de 0,03 mm aproximadamente dado que se encontraba pulverizado. La metodología empleada consistía en la realización de cinco probetas cilíndricas para cada tipo de mezcla (incluyendo una probeta de prueba la cual no poseía plástico), estas se sometían a un ensayo de compresión y luego se realizaba un estudio estadístico para determinar cuál era el porcentaje de reemplazo óptimo de agregado fino por PET. Los resultados obtenidos mostraban que la mezcla con un reemplazo del 4% de arena por plástico reciclado alcanzaba la resistencia mínima requerida y de manera óptima.

Posteriormente, se fabricaron bloques de hormigón (véase Figura 31) con la mezcla anteriormente propuesta y se compararon los resultados con un bloque sin la incorporación de PET. Se observó que la resistencia a la compresión de la muestra con el agregado plástico aumentó con respecto al bloque convencional siendo cada una respectivamente de 9,9 MPa y 9,0 MPa, además de mejorar la resistencia a flexión siendo éstas de 0,60 MPa y 0,46 MPa. También se estudió la absorción de agua de los bloques teniendo en promedio 8,4% para los bloques convencionales y 6,2% para la mezcla con un 4% de PET agregado.



Figura 31: Bloque de hormigón H15 fabricado para los ensayos (Beltran y Ferreira, 2018).

⁷ Según la normativa colombiana un hormigón H15 debería alcanzar 15 MPa a la compresión, sin embargo, la utilización de este material en la fabricación de bloques H15 indica que su valor a la compresión puede variar entre los 5 y los 11 MPa.

Tabla 12: Resumen resultados ensayos técnicos.

Datos		Resistencia a la compresión [MPa]	Resistencia a la flexión [MPa]	Absorción [%]
Convencional	P1	9,40	0,46	8,50
	P2	8,60	0,52	7,50
	P3	9,10	0,39	9,00
4% PET	P4	10,0	0,57	6,40
	P5	9,90	0,60	6,20
	P6	9,80	0,62	6,10

Fuente: Beltran y Ferreira (2018).

Infante y Valderrama (2019), estudiaron las propiedades físicas de un hormigón con reemplazo de áridos finos por PET reciclado en un 0%, 5%, 10%, 15% y 20%, donde dicho plástico tenía un tamaño menor a 5 mm. Como resultado se obtuvo que la densidad del concreto disminuye a medida que aumenta la cantidad de PET, producto de las diferentes densidades que existen entre este material y la arena. La resistencia a la flexión y a la compresión también disminuyen a medida que se aumenta la cantidad de plástico, específicamente se obtiene que las resistencias se reducen en promedio un 20% y un 13% respectivamente. La absorción de agua también disminuye, pero de forma gradual, no obstante, los ensayos de penetración de cloruros mostraron que la probeta con un 10% de PET no se ve tan afectada como las muestras que contenían más de un 15% de plástico, lo cual se contrarresta con la hipótesis que dichos resultados debían ser similares a los obtenidos en el ensayo de absorción de agua. Se infiere entonces, que “*la razón se debe a infiltraciones por las caras exteriores de las probetas donde se formaba lechada, por tener menor cantidad de áridos le es más fácil a la solución de cloruros penetrar por los costados*”.

Tabla 13: Resumen resultados Ensayos Técnicos.

Ensayos	Patrón	Mezcla 5% PET	Mezcla 10% PET	Mezcla 15% PET	Mezcla 20% PET
Densidad [Kg/m ³]	2,21	2,21	2,21	2,20	2,17
Flexión [MPa]	4,83	4,00	4,13	3,73	3,60
Compresión [MPa]	26,1	23,4	24,1	21,4	21,7
Absorción [%]	7,81	7,61	7,26	7,11	7,52
Disminución porcentual [%]	0,00	2,65	7,05	8,93	3,79
Penetración Cloruros [%]	4,14	4,08	3,49	3,96	3,76

Fuente: Infante y Valderrama (2019).

3.2 Análisis de estudios

3.2.1. Resumen de los casos de estudio

A partir de los datos obtenidos en cada estudio (véase Anexo A y B) se puede observar de la Figura 32 que la mayoría de los autores tiende a elaborar mezclas con pequeños porcentajes de PET, dado que estudios anteriores en los cuales se incluyen otro tipo de plásticos (reciclados o no), indican una disminución en la resistencia a la compresión del concreto final a medida que estos aumentan en la mezcla, sin embargo, se aprecia una cantidad no menor de muestras que poseen una sustitución mayor al 40% pero menor al 75% a modo de cuantificar la pérdida de resistencia estimada.

Al analizar aquellas mezclas que son elaboradas teniendo como referencia un hormigón convencional o muestra patrón (la cual no posee PET como agregado), es posible cuantificar la variación de la resistencia a la compresión para diferentes muestras. En la Figura 33 se puede notar que existe una nube de puntos sin tendencia clara cuando se realiza una sustitución entre 0,5% y el 20%, es decir, según los diferentes estudios existen otros factores como la cantidad de cemento utilizado, calidad y propiedades de este, adiciones y forma del PET que pueden producir resultados positivos o negativos, posterior a este porcentaje, se observa una tendencia clara a la disminución de la resistencia en comparación del hormigón patrón.

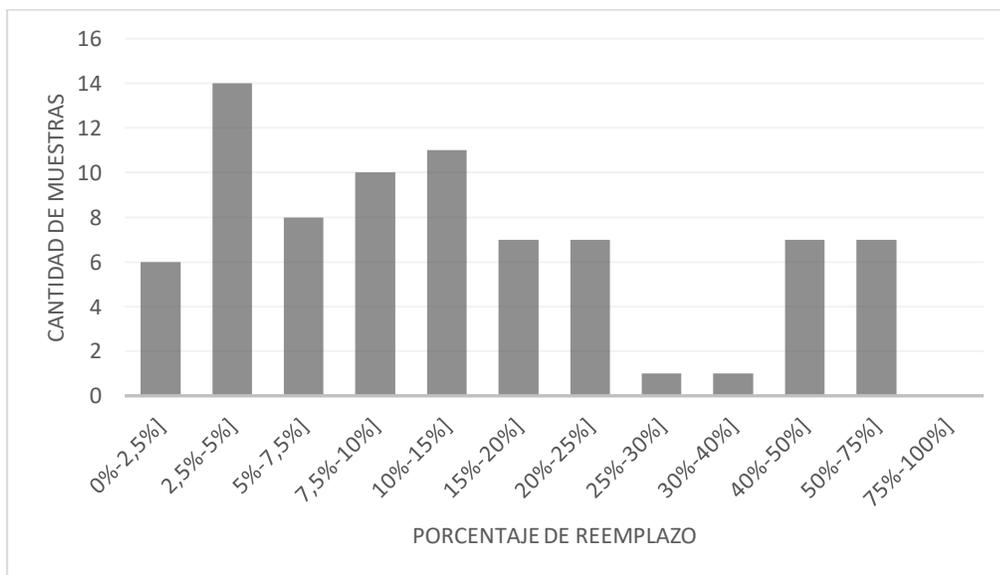


Figura 32: Cantidad de muestras versus porcentaje de reemplazo de PET por agregados finos.

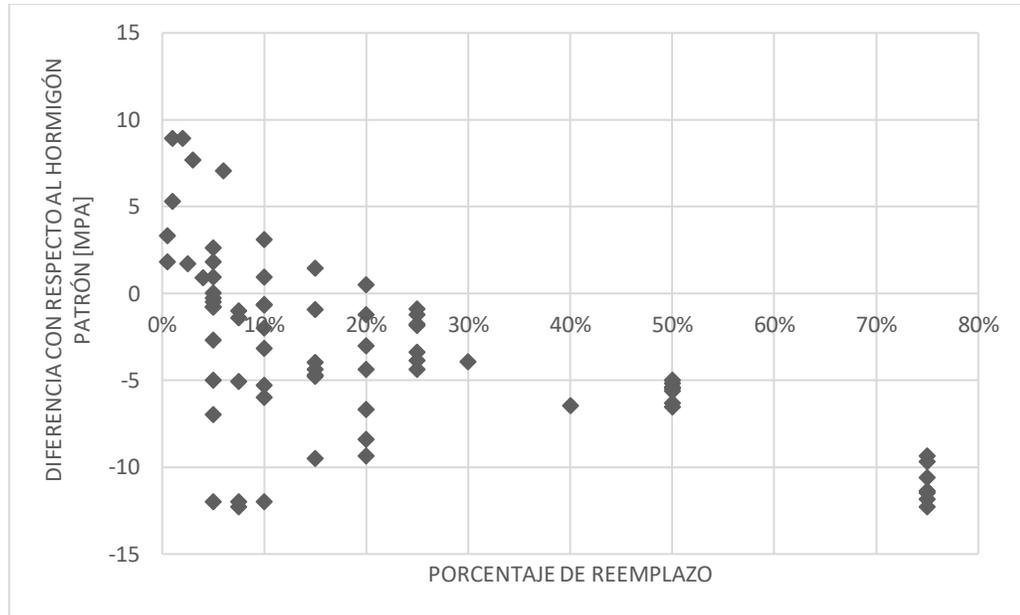


Figura 33: Diferencia de resistencia a la compresión (28 días) de un hormigón con agregado PET (%) respecto a una muestra patrón.

3.2.2. Análisis de resistencia de los hormigones

Gran parte de los estudios analizan el aumento o pérdida de resistencia a la compresión o flexión con respecto al hormigón patrón, sin embargo, es posible encontrar hoy en día que, dentro de una misma muestra, estos hormigones no posean los mismos valores una vez ensayados, y es por ello que se tiene un rango de variabilidad aceptable.

En este subcapítulo se analizará la resistencia de los hormigones tomando como referencia los requisitos de la ACI318-11. Para determinar si el concreto se considera aceptable se debe cumplir con los dos criterios mostrados a continuación:

- a) Que cada promedio aritmético de tres ensayos de resistencia consecutivos es igual o superior a f_c' .
- b) Ningún resultado individual del ensayo de resistencia (promedio de dos cilindros) es menor que f_c' por más de 3,5 MPa cuando la resistencia es igual o inferior a 35 MPa, o por más de $0,1 f_c'$ cuando f_c' es mayor a los 35 MPa.

Como los resultados y condiciones varían según autor, se procederá a analizar de forma separada los criterios (a) y (b) a modo de hacer más prolijo el estudio.

3.2.2.1. Según Hormigón patrón sin agregado PET - Criterio (b)

Debido a que gran parte de los artículos no elabora un hormigón para alcanzar una resistencia especificada, podemos entonces tomar como supuesto que la resistencia f_c' corresponde al valor que obtiene cada mezcla de hormigón sin agregado PET, para poder identificar la cantidad de muestras que cumplen con el Criterio de aceptabilidad (b). A modo de simplificar los cálculos, es posible inferir que cada muestra no puede tener un valor inferior al 90% de la resistencia sin agregado plástico, de esta forma se plantean tres pisos mínimos:

1. Que la diferencia de las resistencias entre la mezcla patrón y la mezcla con agregado PET sea inferior al 10%.
2. Que la diferencia de las resistencias entre la mezcla patrón y la mezcla con agregado PET sea inferior al 5%.
3. Que la diferencia de las resistencias entre la mezcla patrón y la mezcla con agregado PET sea inferior al 2,5%.

Diferencia de resistencia entre la mezcla patrón y la mezcla con agregado PET

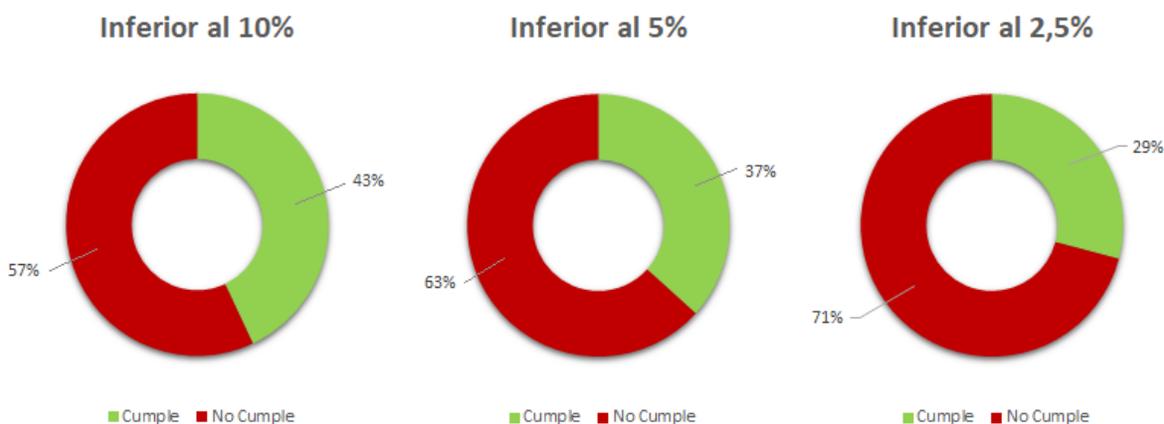


Figura 34: Porcentaje de muestras que cumplen con los criterios estipulados para resistencia a la compresión a una edad de 28 días.

De los resultados obtenidos es posible observar que en los tres casos más del 50% de las muestras no cumplirían con el criterio de aceptabilidad. Si ahora analizamos ensayos adicionales como la resistencia a la flexión y tracción por hendimiento bajo los mismos criterios utilizados para la resistencia a la compresión, es decir, obtener como mínimo el 90% de resistencia de una muestra sin agregado PET, se alcanzan mejores resultados tal como se ve en las Figuras 35 y 36.

Diferencia de resistencia entre la mezcla patrón y la mezcla con agregado PET

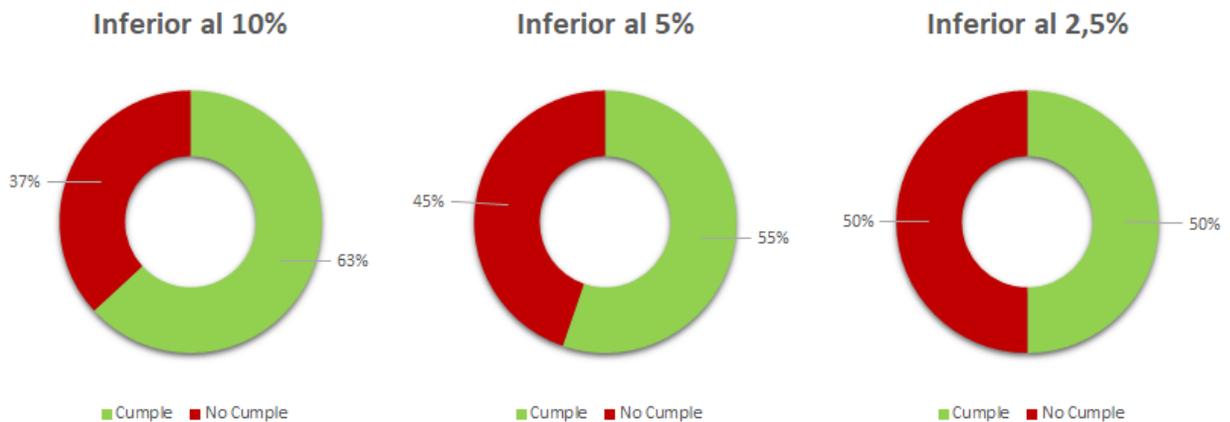


Figura 35: Porcentaje de muestras que cumplen con los criterios estipulados para resistencia a la flexión.

Diferencia de resistencia entre la mezcla patrón y la mezcla con agregado PET

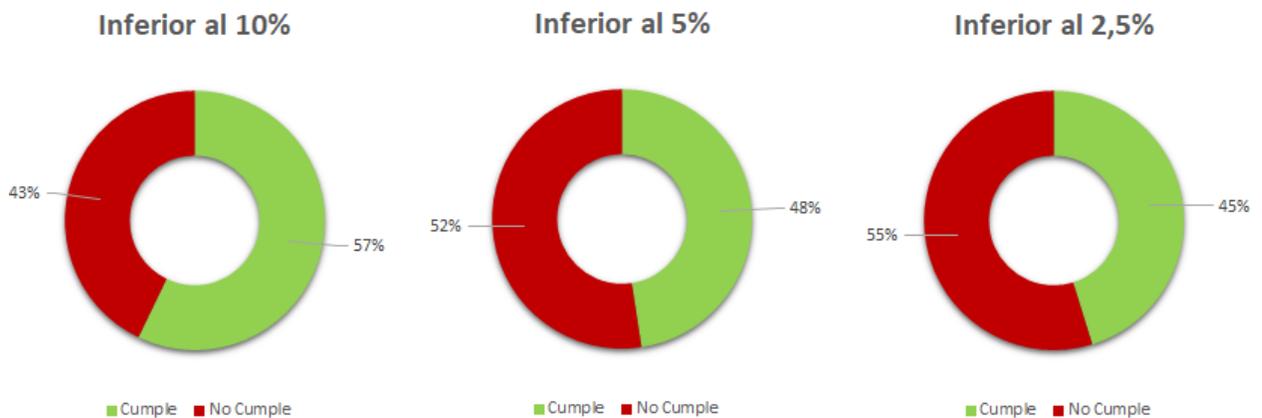


Figura 36: Porcentaje de muestras que cumplen con los criterios estipulados para resistencia a la tracción por hendimiento.

Si estudiamos en detalle aquellos hormigones que cumplen con el Punto (1), es decir, que la diferencia entre la resistencia de un hormigón con y sin PET es igual o inferior al 10%, podremos ver que existe una estrecha relación entre la resistencia alcanzada y la cantidad de cemento utilizado en conjunto con la relación agua-cemento. Tal como mencionan varios autores, un aumento en la relación agua-cemento (véase Figura 37), provoca una disminución en la resistencia a la compresión debido a la presencia de poros o vacíos, mientras que, por otro lado, una disminución en los kilogramos de cements también incluye en la disminución de la resistencia (véase Figura 38).

Otra variable que se debe considerar es el tipo de PET agregado a la mezcla, debido a que varios autores concuerdan en que un plástico tratado mediante calor y que posteriormente adopta una forma cilíndrica regular, tiende a obtener mejores resultados frente a ensayos a compresión que el PET triturado de forma gruesa e irregular, así como también, tiende a lograr mejores asentamientos, mientras que el plástico triturado requiere un aumento

en la relación agua-cemento debido a la baja trabajabilidad y es por ello que se recomendaría la utilización de plastificantes. Sin embargo, se ha visto de igual forma que mezclas realizadas con PET triturado y que tiene una granulometría variable entre 1 mm y 5 mm también logra buenos resultados en cuanto a resistencia.

La cantidad y calidad del cemento también es un componente relevante a la hora de evaluar. Si nos enfocamos en aquellas muestras que cumplen una resistencia superior al 90% podremos observar que mezclas elaboradas con más de 350 Kg de cemento por metro cuadrado de hormigón tienden a obtener mejores resultados. Mientras que, por otro lado, muestras que también tienen buen comportamiento se caracterizan por tener cementos de alta resistencia o una adición como caliza, escoria de alto horno o puzolana.

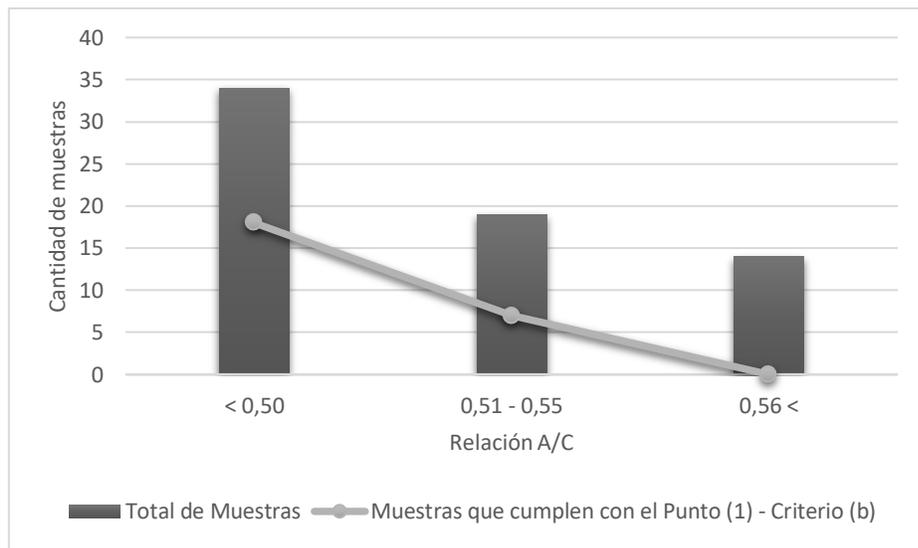


Figura 37: Relación entre cantidad de muestras totales y aquellas que cumplen con una resistencia superior al 90% del hormigón patrón, según su relación agua-cemento.

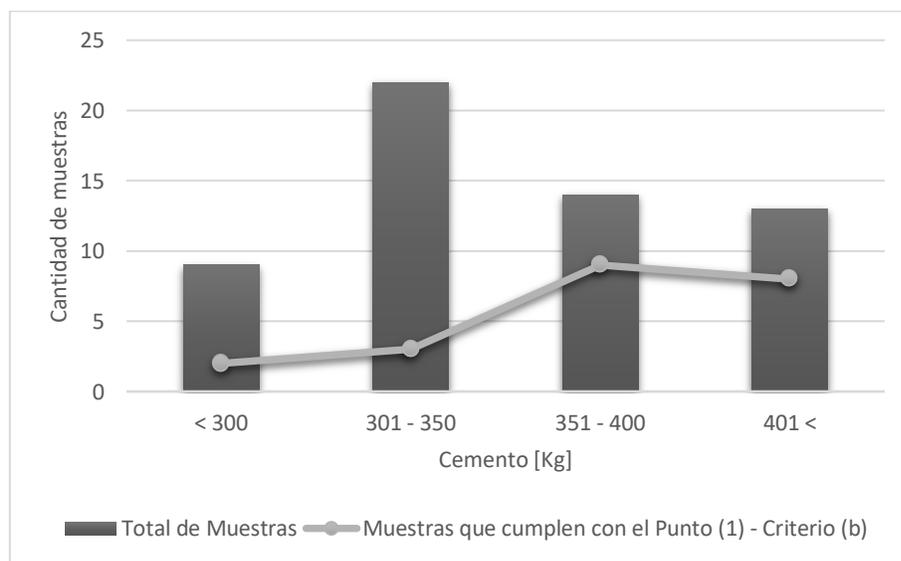


Figura 38: Relación entre cantidad de muestras totales y aquellas que cumplen con una resistencia superior al 90% del hormigón patrón, según la cantidad de cemento.

3.2.2.2. Según Resistencia de diseño – Criterio (a) y Criterio (b)

Las investigaciones realizadas por Ramadevi et al. (2012), Ferreira et al. (2012), Khanna et al. (2015) y Vali et al. (2017), dosifican para obtener una resistencia en particular, por lo tanto, es posible aplicar ambos criterios y de esta forma saber si el hormigón fabricado es aceptable para su uso. Aplicando el Criterio (a) y (b) de manera conjunta se obtiene que el 77% de los casos cumplen con la resistencia a la compresión, por otro lado, si solo vemos el Criterio (b) este número sube hasta el 91%.



Figura 39: Porcentaje de muestras que cumplen con la resistencia a la compresión de diseño.

Enfocándonos en el grado específico de resistencia a la compresión (según probetas cilíndricas), estas varían desde 16 MPa a 30 MPa, sin embargo, estos datos no son suficientes para hacer correlaciones robustas. Las investigaciones de Khanna et al. (2015) y Vali et al. (2017) dosifican hormigones para alcanzar una resistencia de 25 MPa y para los cuales se tiene una correlación del 60% tal como se muestra en la Figura 40.

Como se mencionó anteriormente, a medida que se aumenta la cantidad PET a la mezcla la resistencia a la compresión disminuye, en especial, para una misma preparación cuyo contenido de cemento y relación A/C queda fijo. La correlación indicada nos permite estimar que el porcentaje óptimo de reemplazo para la elaboración de un hormigón G25 sería del 10%, lo que se vería reafirmada por la investigación de Infante y Valderrama (2019) realizada en Chile y que coincide con los objetivos de este trabajo, cuales son dosificar y cuantificar los costos de producción de un concreto teniéndose en cuenta que gran parte de los cementos en el país contienen puzolana.

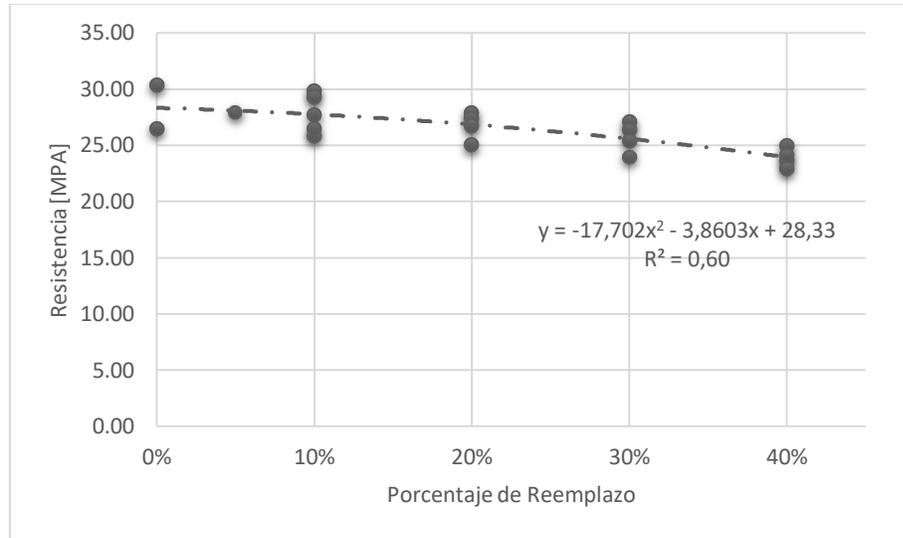


Figura 40: Resistencia a la compresión versus porcentaje de reemplazo para un hormigón G25.

De forma adicional, otras propiedades resultantes de este concreto sería la disminución de la densidad, disminución en el módulo de elasticidad y posible aumento en la absorción de agua en caso de que el hormigón no quede bien mezclado, lo que conllevaría a un aumento en la penetración de cloruros y carbonatación.

3.3. Planteamiento de dosificación

La memoria de cálculo tiene como finalidad obtener las cantidades necesarias para dosificar es hormigón G25, es decir, que pueda resistir un esfuerzo de 25 MPa a la compresión, y de este modo, cuantificar los costos y futuros impactos ambientales que este material genere. Cabe destacar que debido al contexto de emergencia sanitaria en el que se desarrolla este trabajo no es posible realizar los ensayos respectivos para corroborar la hipótesis que aquí se plantea como reemplazo óptimo de PET por áridos finos.

3.3.1. Memoria de cálculo

Como se ha visto de la literatura, la resistencia del hormigón vería dependiendo de muchos factores, entre ellos, podemos destacar el tamaño máximo nominal del árido, donde se utiliza principalmente árido grueso de un tamaño no superior a los 20 mm. También se debe diferenciar entre las dosificaciones realizadas con cenizas volantes, escoria de alto horno o puzolana; el tipo de cemento (normalmente portland tipo I), el uso de aditivos, la relación agua-cemento, la cantidad de PET a utilizar como reemplazo, y además la forma que este posee, si será pulverizada, en fibras, o con diversa geometría y tamaño, la normativa con la cual se ensayó dado que algunas probetas fueron realizadas con forma cilíndricas y otras cúbicas.

Por tanto, la dosificación para 1 m³ de hormigón tomará como referencia los datos obtenidos de la elaboración de morteros por Rojas (2012) y de hormigones por Infante y Valderrama (2019), ambos estudios realizados en Chile. Se evaluará la dosificación para un concreto sin agregado PET y agregado del 5% y 10% de PET respecto al volumen de arena.

Al ser este un hormigón experimental, se dosificará usando el método dado por la ACI211.1-91. Primero se establecerán los puntos específicos para lo cual se realiza la mezcla:

- Concreto grado 25 a la compresión, sin datos estadísticos y sin consideraciones especiales como ambientes de hielo-deshielo, exposición a sulfatos u a otro que provoque corrosión.
- El cono de diseño es de 12 cm, siendo este más representativo ya que puede ser colocado por varios métodos.
- Se utilizará un plastificante reductor de agua, para disminuir costos por cemento, aumentar la trabajabilidad de la mezcla y reducir la segregación, aumentando la cohesividad de la mezcla.
- Debido a que los estudios no presentan mezclas con grava, se tomará un Dn máximo de 19 mm, es decir, el agregado grueso solo estará compuesto por gravilla.
- La granulometría, densidad relativa y absorción de los áridos estará dada por el promedio de tres estudios para canteras pertenecientes a la región metropolitana y a los datos obtenidos por Rojas (2012).
- La granulometría del PET reciclado estará dada por el estudio de Rojas (2012) siendo este considerado como un plástico triturado e irregular, mientras que la densidad del material tomará el promedio obtenido por los estudios de Pelisser et. al (2012), Beltrán y Ferreira (2018), Khanna et. al (2015) y Choi et. al (2009).

Se presenta en la Tabla 15 la granulometría y gravedad específica con la cual se trabajará los agregados de arena y gravilla, mientras que en la Tabla 16 se presenta la granulometría y densidad del PET reciclado.

La Normativa chilena 163 del año 2013, indica que es requerida una proporción adecuada de áridos finos y gruesos para cumplir con las condiciones de compacidad y docilidad, por tanto, se procede a utilizar curvas de árido combinado para un diámetro nominal máximo de 19 mm. En ella es posible identificar dos zonas: la primera para la construcción corriente de poco espesor (menor a 15 cm) y la segunda para construcción con alta densidad de enfierradura y con altas dosis de cemento⁸.

Tabla 14: Granulometría, densidad relativa y absorción de la arena y gravilla.

Arena	Gravilla
-------	----------

⁸ Si bien se calculará una dosificación para un hormigón del tipo armado, se debe tener en consideración una investigación adicional dado que en este informe no se menciona cómo afecta la utilización de PET para un elemento que posee enfierradura o si existen problemas entre la mezcla con el metal.

Tamices		% Pasa Acum.	Tamices		% Pasa Acum.
ASTM	[mm]		ASTM	[mm]	
2"	50,8	100	2"	50,8	100
1 1/2"	38,1	100	1 1/2"	38,1	100
1"	25,4	100	1"	25,4	100
3/4"	19,05	100	3/4"	19,05	97
1/2"	12,7	100	1/2"	12,7	48
3/8"	9,53	100	3/8"	9,53	16
# 4	4,75	88	# 4	4,75	1
# 8	2,36	68	# 8	2,36	0
# 16	1,18	54	# 16	1,18	0
# 30	0,6	38	# 30	0,6	0
# 50	0,3	18	# 50	0,3	0
# 100	0,15	7	# 100	0,15	0
Absorción de agua (%)		1,347	Absorción de agua (%)		0,970
Densidad relativa (kg/m3)		2.673	Densidad relativa (kg/m3)		2.702

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Distribución granulométrica para PET reciclado.

PET

Tamices		% Pasa Acum.
ASTM	[mm]	
# 4	4,75	100
# 8	2,36	28,1
# 16	1,18	5,9
# 30	0,6	1,2
# 50	0,3	0
# 100	0,15	0
Densidad (kg/m3)		1,299

Nota: El estudio de Rojas (2012) presenta como supuesto que el PET reciclado no presenta absorción de agua, sin embargo, otras investigaciones apuntan a que este material posee una absorción cercana al 0,5%.

Fuente: Rojas (2012).

Tabla 16: Árido combinado para Zona 1 según NCh163 Of.2013.

% de Reemplazo	ÁRIDO COMBINADO [%]			
	Arena	PET	Gravilla	Total
0%	0,36	-	0,64	1
5%	0,34	0,02	0,64	1
10%	0,32	0,04	0,64	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17: Árido combinado para Zona 2 según NCh163 Of.2013.

% de Reemplazo	ÁRIDO COMBINADO [%]			
	Arena	PET	Gravilla	Total
0%	0,47	-	0,53	1
5%	0,45	0,02	0,53	1
10%	0,42	0,05	0,53	1

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se procede a calcular la resistencia promedio a la compresión requerida del hormigón (f'_{cr}). Como se mencionó al inicio de esta memoria, no se cuentan con datos disponibles para hacer una desviación estándar por lo que, a la resistencia especificada inicialmente, es decir, a los 25 MPa, se le agregará adicionalmente una resistencia de 8,4 Mpa, obteniéndose finalmente un f'_{cr} de 33,4 MPa.

A continuación, utilizando la tabla de relación entre A/C y la resistencia a la compresión dada por la ACI211.1-91, es posible obtener mediante una línea de tendencia que la correlación entre el agua y el cemento es de 0,48.

Como ya se ha establecido un cono de diseño, es posible entonces calcular el agua utilizando la tabla que relaciona diferentes asentamientos y el tamaño máximo del agregado. El diámetro nominal máximo de la mezcla es de 19 mm, por tanto, se realiza una interpolación de los datos que muestra la tabla, ya que los números de la norma ACI se encuentran en pulgadas. El resultado obtenido es de 209 litros, mientras que el aire atrapado se aproxima al 2%. El agua a su vez se reduce por la incorporación del aditivo plastificante, en este caso se toma como referencia el Sika Plastimenten TM-14, que indica una reducción de hasta el 14% de agua de amasado, siendo la cantidad final de agua a considerar 180 Lt.

La densidad del cemento varía entre los 2,7 y los 3,2 g/cm³, por lo que se usará una densidad promedio de 3 g/cm³, mientras que para el agua se considerará una densidad estimada de 1 g/cm³. De esta forma el volumen ocupado en m³ por el cemento y el agua es de 0,126 y 0,180 respectivamente. Se estima de forma adicional, el volumen ocupado por el aditivo considerando una cantidad de 0,6% respecto al peso del cemento y una densidad de 1,32 Kg/Lt.

Sabiendo que:

$$C + W + u + G + A + F + Ad = 1m^3$$

Donde C es cemento, W es agua libre, u es aire total, G es gravas, A es arenas, F es adiciones y Ad es aditivo.

Tomando a las gravas y arenas como una sola variable (Ar), se tiene la siguiente ecuación:

$$0,169 + 0,209 + 0,02 + Ar + 0,002 = 1m^3$$

$$Ar = 0,672 m^3$$

El volumen obtenido para el diseño de $1 m^3$ de hormigón ahora debe distribuirse entre la gravilla, arena y PET, cuyos porcentajes fueron obtenidos anteriormente tal como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 18: Volumen de áridos para diferentes mezclas según dosificación de $1 m^3$ de hormigón.

Material	Zona 1			Zona 2		
	0%	5%	10%	0%	5%	10%
<i>Gravilla [m3]</i>	0,430	0,430	0,430	0,356	0,356	0,356
<i>Arena [m3]</i>	0,242	0,229	0,215	0,316	0,294	0,278
<i>PET [m3]</i>	-	0,013	0,027	-	0,015	0,031

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se obtienen los valores en kilogramos para las dosificaciones propuestas, sin considerar corrección por humedad, dado que la humedad que posean los áridos al instante de realizar la mezcla en laboratorio es un dato relevante y que debe ser utilizado para corregir la dosificación.

Tabla 19: Dosificación para cada zona establecida por la NCh163 Of.2013 y cada porcentaje de reemplazo por PET.

Material [Kg]	Zona 1			Zona 2		
	0%	5%	10%	0%	5%	10%
<i>Agua</i>	180	180	180	180	180	180
<i>Cemento</i>	378	378	378	378	378	378
<i>Aditivo</i>	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
<i>Gravilla</i>	1162	1162	1162	962	962	962
<i>Arena</i>	647	611	575	844	785	744
<i>PET</i>	-	17	35	-	20	40

Fuente: Elaboración propia

3.4. Propuesta de Caracterización

3.4.1. Áridos

Para la caracterización de los áridos en la elaboración del hormigón se propone determinar:

- La granulometría de la arena, gravilla y PET a utilizar. Para ello se seguirá con el procedimiento establecido en la UNE-EN933-1:2012. Este ítem es muy importante ya que recordemos que la dosificación planteada inicialmente se adapta a un promedio de datos y que la granulometría afecta directamente a las curvas de diseño que nos indican el porcentaje a usar de cada árido.
- La densidad aparente de arena, gravilla y PET. Para ello se seguirá con el procedimiento establecido en la NCh1116 Of.2008 para las dos primeras, mientras que para el PET se ocupará el procedimiento establecido en la UNE-EN 1097-3:1999.
- La densidad real y la absorción de agua de arenas, gravilla y PET. Para ello se debe seguir el procedimiento descrito en la NCh1239 Of.2009, NCh117 Of.2010 y UNE-EN 1097-6:2014 respectivamente
- Las propiedades químicas de los áridos como cloruros y sulfatos en arenas, gravilla y PET. Para ello se debe seguir con el procedimiento descrito en la NCh1444 Of.2010 en el caso de la arena y gravilla, mientras que para el PET se debe seguir con la metodología planteada en la UNE-EN 1744-1 + A1:2013.

El estudio de la absorción de agua y la determinación de cloruros y sulfatos es relevante dado que existe cierta discrepancia entre si efectivamente el PET reciclado en forma triturada absorbe agua. Por otro lado, se debe tener en consideración que si el reciclaje y triturado de las botellas plásticas se realiza de forma manual, estas deben estar completamente limpias o de lo contrario se puede contaminar la muestra con cloruros o sulfatos, afectando finalmente a la mezcla del hormigón.

3.4.2. Hormigón

Para la caracterización de la mezcla de hormigón planteada se propone determinar:

- La docilidad para la cual fue elaborado el hormigón. Para ello se seguirá con el procedimiento establecido en la NCh1019 Of.2009 mediante el método de asentamiento de cono de Abrams.
- La densidad aparente del hormigón fresco. Para ello se seguirá con el procedimiento establecido en la NCh1564 Of.2009.

- La uniformidad de la mezcla de hormigón fresco. Para ello se seguirá con el procedimiento establecido en la NCh789 Of.1986.⁹
- El contenido de aire del hormigón. Para ello se seguirá con el procedimiento establecido en la NCh2184 Of.1992.¹⁰
- La permeabilidad al agua del hormigón mediante presión. Para ello se seguirá con el procedimiento establecido en la NCh2262 Of.2009. ⁹
- La resistencia a la compresión. Para ello se seguirá con el procedimiento establecido en la NCh1037 Of.2009 y se utilizarán probetas cilíndricas tal como se indica en la NCh1017 Of.2009.
- La resistencia a la tracción por flexión. Para ello se seguirá con el procedimiento establecido en la NCh1038 Of.2009 y se utilizarán probetas prismáticas tal como se indica en la NCh1017 Of.2009.

Adicionalmente, se debe tener en consideración realizar entre 15 a 30 probetas para poder obtener datos estadísticos que permitan posteriormente, realizar una dosificación ajustada a una menor resistencia f'_{cr} y de esta forma optimizar la mezcla.

Para complementar la caracterización del hormigón, se plantea también comprobar la resistencia a cargas de fuego y la medición de la aislación acústica. Sin embargo, para realizar dichos ensayos es necesario elaborar elementos de construcción general, como lo son muros, losas, entre otros. Para comprobar la resistencia al fuego se debe seguir el procedimiento establecido en la NCh935/1 Of.1997, mientras que para medir la aislación acústica del elemento se debe seguir el procedimiento establecido en la NCh2786 Of.2003.

Finalmente, se debe recordar realizar una mezcla tradicional para poder comparar los resultados obtenidos, tanto de los ensayos a la mezcla de hormigón, como para la elaboración de elementos estructurales.

⁹ Dado los estudios antes mencionados y la densidad teórica calculada a partir de la dosificación, se asume entonces que es posible implementar este método debido a que la densidad cumple con lo establecido por norma.

¹⁰ Si bien la normativa establece que para implementar estos métodos la densidad de los áridos debe ser superior a los 2000 kg/m³, se asumirá que por el bajo volumen que ocupa el PET en la mezcla (dado que su densidad real bordea los 1.300 kg/m³), la mezcla cumple con lo establecido para realizar los ensayos.

Capítulo 4

4. Estudio de mercado e impacto ambiental

4.1. Análisis comercial

4.1.1. Contexto comercial del hormigón en Chile y el Mundo

La industria del hormigón a nivel mundial aumenta constantemente en términos monetarios como productivos, según un reporte realizado por Global Concrete en el año 2018, se estimó de forma baja que la producción de hormigón ready-mix alrededor del mundo fue de 388 millones de metros cúbicos, y esto dado que si bien existen numerosas empresas que producen concreto a gran escala, ellas no informan la producción real (que puede ser confundida con la capacidad de producción), un ejemplo de las 25 empresas que lideran la producción real de hormigón se observa en la Tabla 21. Dentro de la misma tabla es necesario destacar lo difícil que es obtener datos referentes al volumen de concreto fabricado por todos los países, de hecho, para obtener el porcentaje con respecto al mundo se utilizó una proporción relativa a la cantidad de cemento elaborada en Reino Unido el año 2016, en conjunto con la producción de hormigón para el mismo año, al implementar dicha proporción junto con las toneladas de cemento fabricada en el mundo, dan como resultado alrededor de 3717 millones de metros cúbicos de concreto.

Tabla 20: Top 25 productores de hormigón en el mundo ordenados por volumen de hormigón vendido en el año 2017.

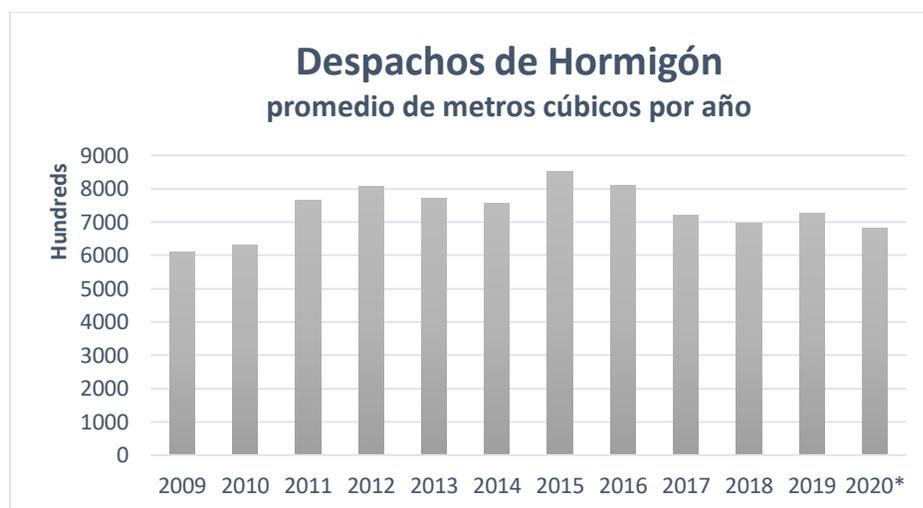
Ranking	Compañía	país	Mm ³ (2017)	% del top 25	% c/r al mundo
1	CNBM	China	82,22	21,20	2,21
2	Cemex	Mexico	52,00	13,41	1,40
3	LafargeHolcim	Suiza	50,60	13,04	1,36
4	HeidelbergCement	Alemania	47,20	12,17	1,27
5	CRH (inc. Oldcastle)	Irlanda	27,00	6,96	0,73
6	BBMG Corporation (with Jidong)	China	14,73	3,80	0,40
7	UltraTech Cement	India	14,00	3,61	0,38
8	Buzzi Univem	Italia	12,30	3,17	0,33
9	Cementos Argos	Colombia	10,60	2,73	0,29
10	Vicat	Francia	9,70	2,50	0,26
11	Votorantim	Brasil	7,80	2,01	0,21
12	China Resources Cement	China	7,26	1,87	0,20
13	US Concret Inc.	USA	6,88	1,77	0,19

<i>Continuación</i>					
14	Martin Marietta Materials (including TXI)	USA	6,54	1,69	0,18
15	TITAN Group	Grecia	5,60	1,44	0,15
16	Cementir Holding	Italia	5,10	1,31	0,14
17	Thomas Concrete Group	Suecia	4,80	1,24	0,13
18	Summit Materials	USA	3,58	0,92	0,10
19	Cimsa	Turquía	3,44	0,89	0,09
20	Vulcan	USA	2,90	0,75	0,08
21	ACC Limited	India	2,88	0,74	0,08
22	MDU Resources Group	USA	2,71	0,70	0,07
23	Intercement (Owner Camargo Correa)	Brasil	2,70	0,70	0,07
24	Limark Concrete	Turquía	2,70	0,70	0,07
25	GCC Grupo Cementos de Chihuahua	Mexico	2,65	0,68	0,07
Total			387,89	100,00	10,46

Fuente: Global Concrete report (2018).

Por otro lado, un reporte realizado por National Ready Mixed Concret Association (NRMCA), asociación en la cual se encuentran inscritos gran parte de los productores de hormigón en Estados Unidos y productores de países como Alemania, Brasil, Dinamarca, Inglaterra y Nueva Zelanda, establecieron que para el año 2016 el precio promedio de un metro cúbico de concreto bordeaba los 142 dólares.

En términos nacionales, según la Cámara Chilena de la Construcción para el año 2019 se produjeron alrededor de 727.000 metros cúbicos de hormigón promedio mensual, siendo las principales empresas que distribuyen este material Ready Mix S.A., Hormigones Premix S.A., Pétreos S.A., Tecnomix S.A., Hormigones Transex y Hormigones BSA., todos ellos filiales de las principales distribuidoras de cemento, como lo son Cementos Bio Bio, Melón, Polpaico, Transex y BSA.



(*) Promedio obtenido del primer trimestre

Figura 41: Despachos de hormigón en Chile en m^3 por año (Elaboración propia a partir de los datos de la CChC).

4.1.2. Costos en la producción de hormigón con agregado PET

Al realizar una búsqueda sobre precios al por menor de cementos comercializados en Chile, se encuentra que el promedio de venta de un cemento normal es de los 2.700 CLP mientras que el cemento especial o de alta resistencia es entre un 15% a un 20% más caro, teniendo un costo promedio de 3.500 CLP por sacos de 25 Kg, tal como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 21: Cementos comercializados en el país (en pesos chilenos).

Cemento especial BSA	\$ 2.650
Topex hormigón	\$ 2.690
Cemento Polpaico	\$ 3.089 - \$ 3.490
Cemento La Unión	\$ 2.590
Cemento especial Transex	\$ 3.000 - \$ 3.390
Cemento especial Polpaico	\$ 3.490
Cemento especial Melón	\$ 2.750 - \$ 3.490
Cemento CBB puzolánico	\$ 3.490

Fuente: Elaboración propia

Mientras que, por otro lado, se tiene una mayor variación en los precios de áridos como la gravilla y arena, debido a que la calidad y transporte juegan un rol fundamental en los costos. En la Tabla 23 se muestra parte de algunos distribuidores de árido por metro cúbico en Santiago considerando IVA, más no transporte.

Tabla 22: Distribuidores de áridos.

	<i>CMGC</i> ¹¹	<i>FSS</i> ¹²	<i>SODIMAC</i> ¹³	<i>TRANSVEG</i> ¹⁴	<i>ECDP</i> ¹⁵
<i>Gravilla</i>	\$ 15.900	\$ 14.280	\$ 43.131	\$ 9.800	\$ 14.000
<i>Arena</i>	\$ 18.900	\$ 22.610	\$ 22.073	-	\$ 14.000

Fuente: Elaboración propia

Para el aditivo se considerará un costo de \$333 más IVA por kilogramo (considerando venta al por menor), mientras que el precio del PET reciclado resulta más complicado de encontrar dado que aún no existen una industria desarrollada en el país. Según el portal Desafío Tierra se estima que el precio de venta de 1 Kg de PET transparente es de \$340 en Chile, mientras que El Financiero, página web Mexicana estima que el precio de 1 Kg de PET reciclado sería de 13 MXN, lo que equivale a \$450 chilenos. De manera adicional, se evalúa que para producir un kilogramo de plástico reciclado se deberían recolectar 30 botellas de 600 ml.

Finalmente se obtienen los costos de elaborar un hormigón sin agregado PET, y con sustitutos del 5% y 10% de arena por plástico reciclado, tal como se muestra en la Tabla 24 utilizando valores estimados de cemento de alta resistencia (dado que la dosificación por medio del método ACI considera cementos de características similares a ellos), áridos y aditivos al por menor, junto con la estimación del valor del PET. De debe destacar que en caso de que se cuente con una maquinaria especializada es posible triturar las botellas de forma particular y ahorrar el costo de compra del material.

Tabla 23: Precio del Hormigón en pesos chilenos por metro cubico (al por menor).

	0%	5%	10%
<i>Zona 1</i>	\$ 66.386	\$ 69.573	\$ 72.761
<i>Zona 2</i>	\$ 66.802	\$ 70.315	\$ 73.981

Fuente: Elaboración propia

El precio del hormigón con sustitución de áridos fino, aumenta entre un 5% y un 11% por metro cúbico. Estos valores pueden considerarse como una barrera para que la implementación sea efectiva en el rubro, por lo que se requiere incentivar su uso con el apoyo de políticas públicas.

¹¹ Recuperado de <http://www.cmgc.cl/>

¹² Recuperado de <http://fsstransportes.cl/aridos/>

¹³ Recuperado de <https://www.sodimac.cl/sodimac-cl/category/scat876998/arenas-y-aridos/>

¹⁴ Recuperado de <https://conveniomarco.mercadopublico.cl/>

¹⁵ Recuperado de <https://www.elconstructordepueblo.cl/>

4.2. Análisis ambiental

4.2.1. Impacto ambiental en la generación de plástico

Según *PlasticsEurope*, la voz oficial de los fabricantes de plástico en Europa estimó que para el año 2018 se produjeron alrededor de 359 millones de toneladas de plástico en el mundo. En el documento también se especifica la demanda europea por tipo de plástico para el mismo año, el cual puede ser catalogada por siete categorías:

1. Polipropileno (PP)
2. Polietileno de baja densidad (PE-LD) y Polietileno lineal de baja densidad (PE-LLD)
3. Polietileno de alta densidad (PE-HD) y Polietileno de media densidad (PE-MD)
4. Policloruro de vinilo (PVC)
5. Poliuretano (PUR)
6. Polietileno tereftalato (PET)
7. Poliestireno sólido (PS) y Poliestireno sólido expandido (EPS)

En Chile, por otro lado, el Centro de Envases y Embalajes de Chile, CENEM determinó que para el año 2015 se produjeron 73.840 Toneladas de botellas PET y proformas, siendo un consumo promedio de 26 litros por persona al año, según research analyst de Euromonitor International se proyecta para el año 2020 un consumo promedio de 36 litros, lo que incrementaría la producción de botellas de PET a más del doble comparado con el año 2015.

Demanda por tipo de polímeros en Europa 2019

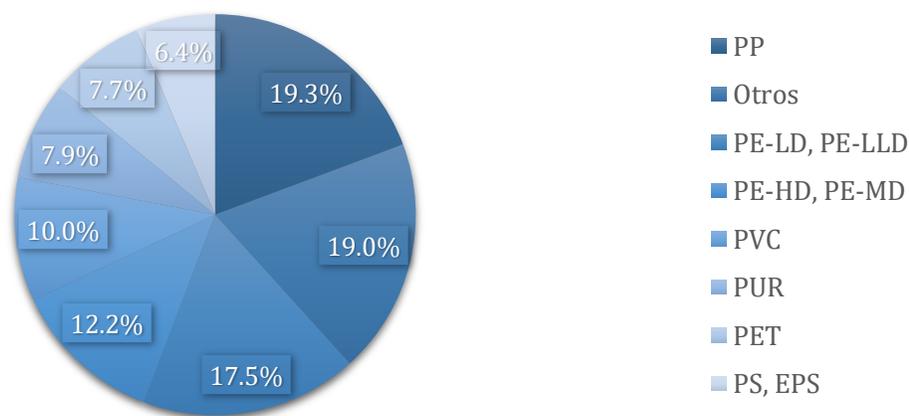


Figura 42: Porcentajes relativos a la demanda de plásticos en Europa el año 2019 (PlasticsEurope, 2019).

Según Webb et al. (2012) los desechos de este material pueden ser eliminados a través de tres formas. La primera y más utilizada es depositarla en vertederos junto con los demás desechos, la segunda es incinerándola y, por último, reciclándola. Cada una ellas tienen sus costos y beneficios que se proceden a explicar a continuación:

- **Depositada en vertederos:** La primera desventaja de este método es que debido a la composición de este material y de los plásticos en general, su degradación toma largos periodos de tiempo, incluso se ha mostrado que muchos de estos desechos han persistido por más de 20 años, y no se tiene certeza de cuanto tiempo más se mantendrán en el medio. Los plásticos en los vertederos también producen un segundo efecto en la contaminación ambiental ya que, además de contaminar la tierra y ocupar varios metros cuadrados que pueden destinarse a otros fines, estos materiales producen gases orgánicos como el benceno, tolueno, entre otros.
- **Incinerada:** A diferencia del primer método descrito, la incineración de plásticos no requiere ocupar grandes cantidades de tierra para su depósito, e incluso, se puede recuperar parte de la energía en forma de calor. Sin embargo, este procedimiento conduce a la formación de numerosos compuestos nocivos, de los cuales, la mayoría son liberados a la atmósfera. PAHs, PCBs, metales pesados, radicales libres tóxicos a base de carbón y oxígeno, sin mencionar las cantidades significativas de los gases de efecto invernadero son liberadas cuando se incineran los plásticos.
- **Reciclaje:** Dado los daños significativos al medio ambiente de los dos últimos métodos, nace el procedimiento de reciclaje del plástico, el que posee dos enfoques actualmente para el PET: químico y mecánico.

El proceso químico del PET consta en la despolimerización del plástico, esto puede obtenerse a través de diferentes procedimientos como hidrólisis y metanólisis que dan como resultado unidades de monómeros que pueden ser recuperados y usarse como material de polimerización y así producir nuevamente plástico. El reciclaje mecánico del PET consta de varios pasos como la eliminación de material contaminante a través de la clasificación de los plásticos (entre los contaminantes del PET encontramos, por ejemplo, el PVC), este procedimiento se debe hacer de forma manual. Una vez separado de los otros materiales, el PET se muele en escamas, se lava y se seca. Sin embargo, se ha visto que, si se desea usar este procedimiento para la fundición y extrusión en nuevas formas del plástico reciclado, surgen limitación debido a contaminantes al momento de separar los plásticos, tintes indeseados en el nuevo plástico y en el peor de los casos, contaminantes derivados del mal uso del PET por parte de los consumidores (como el almacenamiento de combustible, pesticidas u otros) que son riesgos potenciales para la salud en productos de PET reciclado.

Si bien, los procesos de reciclaje abordan las deficiencias ambientales dadas por los primeros dos métodos, este proceso es relativamente costoso e ineficiente. La presencia de aditivos e impurezas puede complicar el proceso de reciclaje y disminuir tanto el rendimiento como la calidad de los productos recuperados.

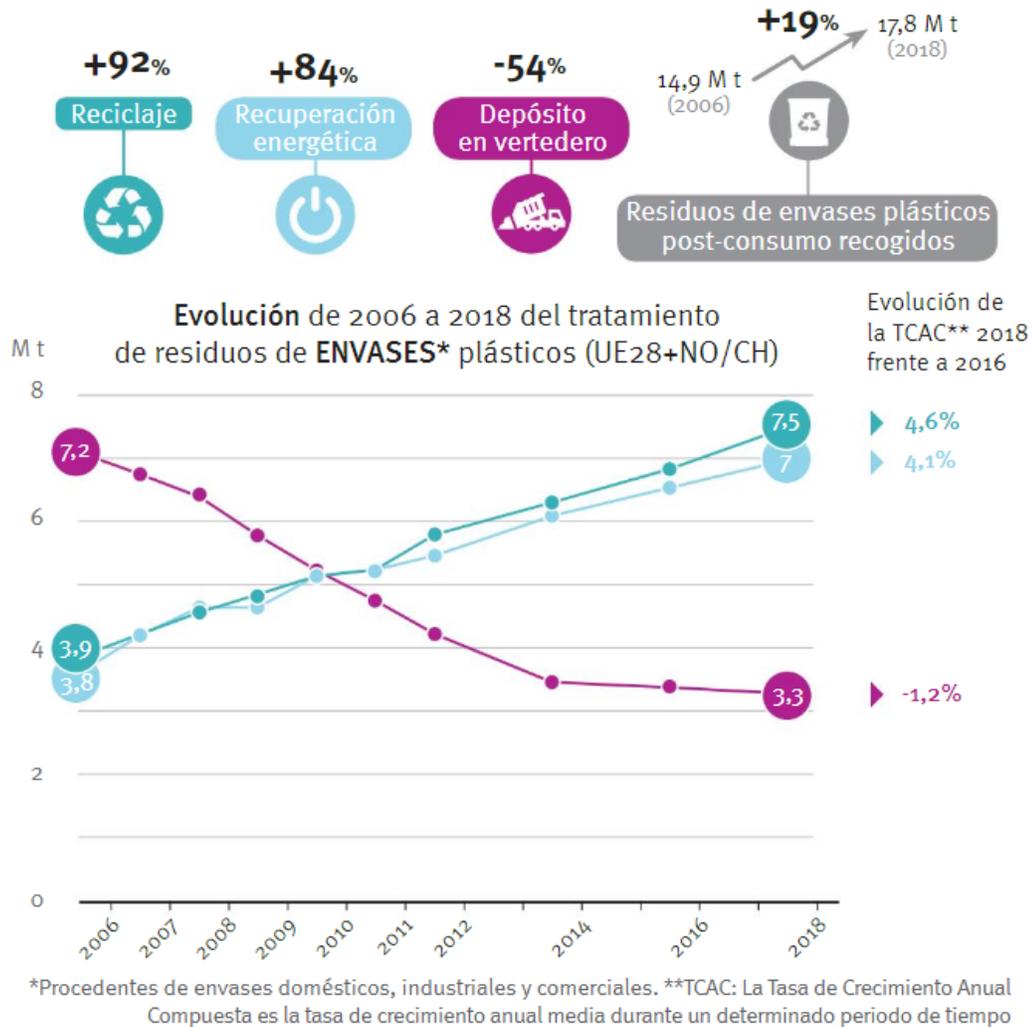


Figura 43: Evolución de tratamientos para desechos de plásticos 2006-2018 en la Unión Europea, Noruega y Suiza (PlasticsEurope, 2019).

La estimación planteada anteriormente por Webb et al. (2012), hace referencia al uso del PET reciclado para la fabricación de nuevos envases transparentes y que sirvan para el almacenamiento de comida o bebestibles, sin embargo, según CocaCola Chile® (s.f.) “de los residuos livianos post consumo que se producen en Chile y que sí se reciclaron, las botellas PET son las que exhiben las mejores perspectivas de reinsertarse al sistema, convertidas en material nuevo y productos novedosos. La fibra extraída de las botellas plásticas es la base de un creciente mercado textil, que va desde el vestuario, hasta los

tapizados de vehículos o muebles, alfombras y rellenos para sacos de dormir o almohadas”.

En el país encontramos empresas como EnFaena y Recipet, que apoyan el reciclaje de este tipo de materiales. La primera de ellas diseña, implementa y opera programas cero residuos que apunten hacia una economía circular, mientras que la segunda es una de las recicladoras de plásticos PET más grande de Sudamérica.

4.2.2. Impacto ambiental en el ámbito de la construcción a nivel nacional

La generación de residuos en la construcción indica que los desechos se componen principalmente de áridos, cementos y ladrillos sumado a otros tipos de residuos que también se generan en la construcción, como los artículos de aseo, ropa, envases de alimentos, botellas, papeles, entre otros (Corporación de desarrollo Tecnológico, 2018).

Tabla 24: Composición residuos de la construcción en Chile.

Material	Composición	Material	Composición	Material	Composición
Áridos	79,00 %	Parquet	0,13 %	Flexit	0,04 %
Cementos	11,20 %	Teja Arc.	0,13 %	Fierro pe	0,03 %
Ladrillo	5,36 %	Cerámica piso	0,10 %	Plancha zinc	0,02 %
Revestimientos plásticos	2,38 %	Clavos y tornillos	0,08 %	Azulejos	0,02 %
Maderas	0,45 %	Alambre	0,06 %	Tubo PVC	0,01 %
Yeso	0,39 %	Cerámica muro	0,06 %	Fierro PI	0,01 %
Fierro Red	0,32 %	Pizarreño	0,05 %	Bloques	0,01 %
Cañería cobre	0,21 %	Baldosa	0,05 %	Teja Pizarreño	0,01 %
Masisa	0,18 %	Tubo fierro	0,04 %	Alfombra	0,01 %

Fuente: CDT (2018).

La generación, manejo y disposición de estos desechos tienen impactos negativos en el ámbito ambiental, social y económico. En el plano ambiental, los residuos de construcción y demolición (RCD) *“contaminan el suelo y el agua, ya que al entrar en contacto con la lluvia se contaminan las aguas superficiales y subterráneas. Intensifican el cambio climático al aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero, tanto su transporte como su disposición (inadecuada)”.*

El plano social se ve afectado particularmente por la disposición irregular de estos RCD, *“los vertederos ilegales impactan directamente en la calidad de vida y salud de los habitantes, en general de sectores más vulnerables, desplazando a la población, creando fuentes de vectores, infecciones y plagas. Produce inestabilidad en los suelos, aumentando el riesgo de desprendimiento de tierra, riesgo de incendios por vertidos de residuos peligrosos y/o combustibles, entre otros”.*

Finalmente, en el plano económico la generación de grandes volúmenes de RCD afecta la productividad de la empresa, dado que *“estos materiales fueron comprados, trasladados por un trabajador a un sector de la obra que queda inutilizable y trasladado nuevamente a un sitio de disposición final para su abandono”* (CDT, 2020).

Según la Corporación de Desarrollo Tecnológico (2020), la Ley 20.920 tiene como objetivo definir un orden en la preferencia de manejo de residuos para disminuir su envío a eliminación en botaderos autorizados para RCD, es por eso que la gestión de estos desechos se enmarca en el principio denominado *“Jerarquía de Pirámide Invertida”*, la cual busca poner en valor los residuos, alargando su vida útil en los procesos productivos e incluso reincorporándolo en los procesos productivos, previo a su eliminación final en un lugar apropiado.

“La pirámide invertida de gestión de residuos se utiliza como una serie de filtros consecutivos considerando como primera alternativa prevenir su generación. Cuando la prevención se salta, falla o no se puede conseguir, se van evaluando las alternativas siguientes con el objetivo de evitar que los RCD alcancen su eliminación. Estas alternativas no son excluyentes y se pueden aplicar de forma simultánea dependiendo de la materialidad de los RCD, volumen, disponibilidad técnica de tratamiento y las características de cada proyecto, entre otros factores.” (CDT, 2020, p.10).



Figura 44: Pirámide Invertida de jerarquización de gestión de residuos (RECYLINK¹⁶, 2019).

En la guía para el control y la prevención de la contaminación industrial elaborada por la ACHS en el año 2001 para el rubro de productos de cemento y hormigón, se muestra una caracterización de emisiones a la atmósfera. En la guía se alude a que el material particulado es el único polutante directamente relacionado con las emisiones y este consiste principalmente a polvo de cemento, además de áridos y emisiones de polvo de arena. Durante el procesamiento de áridos, ocurren emisiones de PM y PM-10 en diversas operaciones, las cuales se denominan según la fuente: de procesos y de polvo fugitivo.

¹⁶ Recuperado de <https://www.recylink.com/RCD>

Las fuentes de proceso son partículas pesadas que pueden ser abatidas dentro de la misma planta, pero las fuentes de polvo fugitivo se generan al no ser controladas correctamente, dentro de las cuales encontramos el levantamiento de polvo por la acción del viento o el movimiento de máquinas.

Dentro del documento se presentan los datos obtenidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, acerca de los factores de emisión para ciertas etapas en el procesamiento de áridos y agregados (véase Tabla 26), además de los factores de emisión para etapas en la producción de materiales de cemento, hormigón y actividades asociadas (véase Tabla 27).

Tabla 25: Factores de emisión para algunas etapas en el procesamiento de áridos y agregados.

<i>Fuente</i>	<i>Filtrable</i>	
	PM	PM-10
<i>Horneado o cribado</i>	E	0,00760
<i>Horneado o cribado controlado</i>	E	0,00042
<i>Chancado primario</i>	0,00035	NI
<i>Chancado secundario</i>	NI	NI
<i>Chancado terciario</i>	E	0,00120
<i>Chancado primario controlado</i>	NI	NI
<i>Chancado secundario controlado</i>	NI	NI
<i>Chancado terciario controlado</i>	E	0,00029
<i>Molienda de finos</i>	E	0,00750
<i>Molienda de finos controlada</i>	E	0,00100
<i>Horneado de finos</i>	E	0,03600
<i>Horneado de finos controlado</i>	E	0,00110
<i>Punto de transferencia del transportador</i>	E	0,00072
<i>Descarga del camión: piedra fragmentada</i>	NI	$8 \cdot 10^6$

Los factores representan las emisiones no controladas a menos que se indique lo contrario

NI: No información

E: En Reevaluación por parte de la EPA

Todos los valores están en kg/ton de material procesado

Fuente: ACHS (2001).

Dentro de los factores que afectan el procesamiento de áridos se encuentra la distribución por tamaño de las rocas (contenido de finos), el contenido de humedad superficial de la roca procesada (dichas partículas se aglomeran en la superficie de las piedras con mayor tamaño), el tipo de equipos, operación, factor climático, entre otros. Mientras que dentro de los factores que afectan la producción de cemento y hormigón, se encuentra la transferencia del cemento hasta un silo (la fuente se recolecta usualmente mediante un filtro), el vaciado de sacos, el tráfico vehicular y todo lo que conlleva el traslado del material por vía motorizada, además se destaca una cantidad de emisiones fugitivas durante la transferencia de arena y agregados, que dependen principalmente del contenido de humedad superficial del material, el grado de protección en las actividades y pilas.

Tabla 26: Factores de emisión para etapas en la producción de materiales de cemento y hormigón y actividades asociadas.

Fuente	Filtrable	
	PM	PM-10
<i>Transferencia de arena y agregados a tolva elevada</i>	0,014	NI
<i>Descarga de cemento a silos elevados de almacenamiento</i>	0,130	NI
<i>Carga de la balanza-tolva de pesaje</i>	0,010	NI
<i>Carga del mezclador</i>	0,020	NI
<i>Carga del camión</i>	0,010	NI
<i>Tráfico vehicular (calles no pavimentadas)</i>	4,500	NI
<i>Arrastre de arena y agregados por la erosión del viento</i>	3,900	NI
<i>Emisiones totales del proceso de los camiones de mezcla</i>	0,050	NI

Los factores representan las emisiones no controladas

NI: No información

Todos los valores están en kg/ton de material mezclado, consistente en una medida típica de 227 kg de cemento, 564 kg de arena, 864 kg de áridos y 164 kg de agua.

Fuente: ACHS (2001).

4.2.3. Análisis de ciclo de vida hormigón con agregado PET como reemplazo de áridos finos

Según la ISO 14040, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) “es una recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida”, siendo el ciclo de vida definido como “etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final”.

Para cuantificar el consumo de energía y emisión de CO₂ que produce un nuevo material como la elaboración de hormigón con PET reciclado, Infante y Valderrama (2019) analizaron mediante un ACV el impacto que genera la extracción de materias primas, transporte, fabricación, construcción, uso y demolición enfocados en la utilización de bloques de hormigón para usos en mampostería con agregado de PET como reemplazo de agregado fino al 10%.

La metodología utilizada en su estudio seguía los principios de la normativa ISO 14040:2006, enfocándose en el cálculo de la huella de carbono a través del consumo energético en kW/h., dado por las diferentes etapas por las cual debe pasar el material de construcción, entre las que se destaca transporte a faena, construcción y demolición (véase Tabla 28).

Tabla 27: Emisión de CO₂ eq y consumo energético para la extracción de materias primas del producto.

<i>Extracción de Materias Primas</i>	<i>KgCO₂</i>	<i>Kwh/M³</i>
<i>Agregado Grueso</i>	0,30	7,65
<i>Agregado Fino</i>	0,67	24,58
<i>Cemento</i>	14,64	484,58
<i>PET (10%)</i>	0,27	6,50
<i>Total</i>	15,88	523,31

Fuente: Infante y Valderrama (2019).

Tabla 28: Emisión de CO₂ eq y consumo energético para todo el ciclo de vida del producto.

<i>Etapa</i>	<i>KgCO₂</i>	<i>Kwh/M³</i>
<i>Extracción de Materia Prima</i>	15,8800	523,31
<i>Transporte</i>	2,6200	87,20
<i>Fabricación</i>	0,0004	0,96
<i>Construcción</i>	1,9800	65,41
<i>Uso</i>	11,2400	370,60
<i>Demolición</i>	1,3200	43,60
<i>Total</i>	33,0404	1091,08

Fuente: Infante y Valderrama (2019).

Entre los datos destacables, se encuentra el proceso de fabricación, que no emite cantidades significativas de CO₂ y consume un 42% menos de energía al compararla con la elaboración de un hormigón convencional (Carmona, 2010), debido a la maquinaria eléctrica utilizada. El cemento es la materia prima que más impacta al medio ambiente al generar alrededor de 15 Kg de CO₂, mientras que la segunda materia prima más contaminante corresponde al agregado fino (el cual se está reemplazando por PET). Por otro lado, la etapa del uso también aporta significativamente a las emisiones de CO₂ del producto, lo cual se debe a “la calefacción y refrigeración del hogar durante la vida de la vivienda”.

4.3. Ventajas y Desventajas de un Hormigón con agregado PET como reemplazo parcial de áridos finos

El uso de PET en hormigones como sustituto de agregados naturales trae consigo resultados positivos como negativos. A nivel global las propiedades físicas son relativas a los materiales utilizados en cada estudio, es por ello que, por ejemplo, se tiene que algunas muestras presentaban un aumento en la resistencia a la compresión de un 29% mientras otras registran una pérdida de la resistencia hasta en un 65%, al compararlas con un hormigón convencional.

Tabla 29: Análisis global de muestras.

	<i>Compresión</i>	<i>Flexión</i>	<i>Tracción</i>
<i>Perdida máxima de Resistencia</i>	65,1%	49,5%	64,3%
<i>Ganancia máxima de Resistencia</i>	28,7%	85,5%	12,8%
<i>Diferencia promedio de Resistencias</i>	- 4,7 MPa	0,1 MPa	-0,4 MPa
<i>Desviación de las Resistencias prom.</i>	6,8 MPa	1,4 MPa	0,6 MPa

Fuente: Elaboración propia

Si ahora analizamos solamente las muestras que realizan un reemplazo de áridos finos en un 5% y un 10% (independiente si estas cumplen o no con los criterios de aceptabilidad mostrados en el Capítulo 3), podemos ver que estos valores bajan, ya que como se ha mencionado anteriormente, muestras con bajas cantidades de PET muestran resultados más favorables.

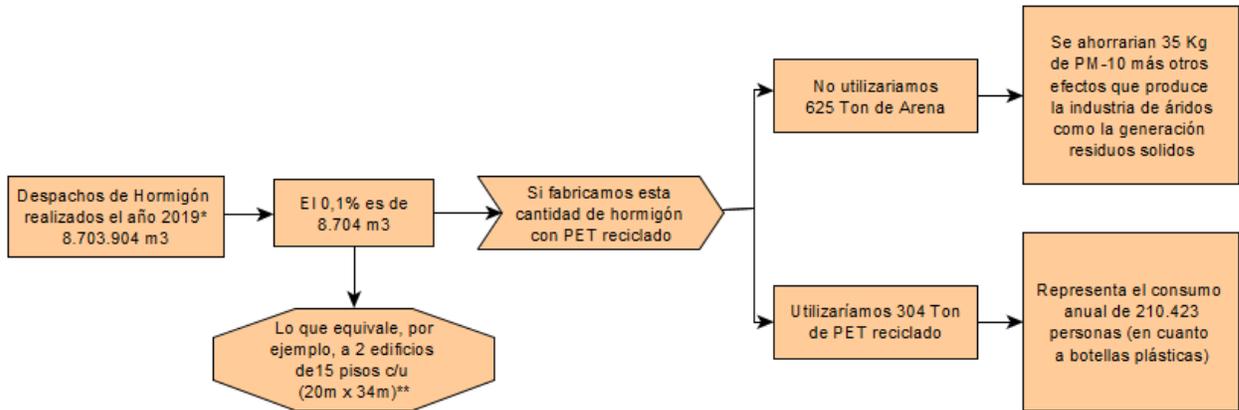
Tabla 30: Análisis global de muestras con reemplazo del 5% y 10% de áridos finos por PET.

<i>Resistencia a la compresión</i>	<i>Porcentaje de Reemplazo</i>	
	5%	10%
<i>Perdida máxima</i>	27,9%	48,8%
<i>Ganancia máxima</i>	28,7%	11,5%
<i>Diferencia promedio</i>	-0,8 MPa	-4,7 MPa
<i>Desviación prom.</i>	4,6 MPa	7,1 MPa

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, también se tiene que el módulo de elasticidad del hormigón con agregado PET se reduce entre un 2% y un 70%, sin embargo, gran parte de los estudios cumple con los parámetros propuestos por el Manual americano de concreto (1952), donde se menciona que los valores del módulo de elasticidad de un hormigón convencional varían entre 13.700 y 41.200 MPa. La absorción de agua en algunos casos disminuye hasta en un 9%, mientras que en otros casos este parámetro aumenta en un 56%. Este último se ve influenciado al momento de preparar el hormigón, ya que un mezclado deficiente aumenta las probabilidades de los materiales no queden completamente homogéneos. Otras de las propiedades que se ve afectada por la incorporación de PET a la mezcla es la resistencia a la abrasión, la cual mejora respecto a un hormigón convencional, sin embargo, dado que los autores no poseen un método único de ensayo, no es posible cuantificar la mejora promedio (véase Anexo C, D y E).

En la sección 4.1.2 se observa que el hormigón con reemplazo de agregados naturales por plástico reciclado presenta costo más elevados que el hormigón convencional, pero si estudiamos en detalle parámetros ambientales podríamos hacer los siguientes supuestos.

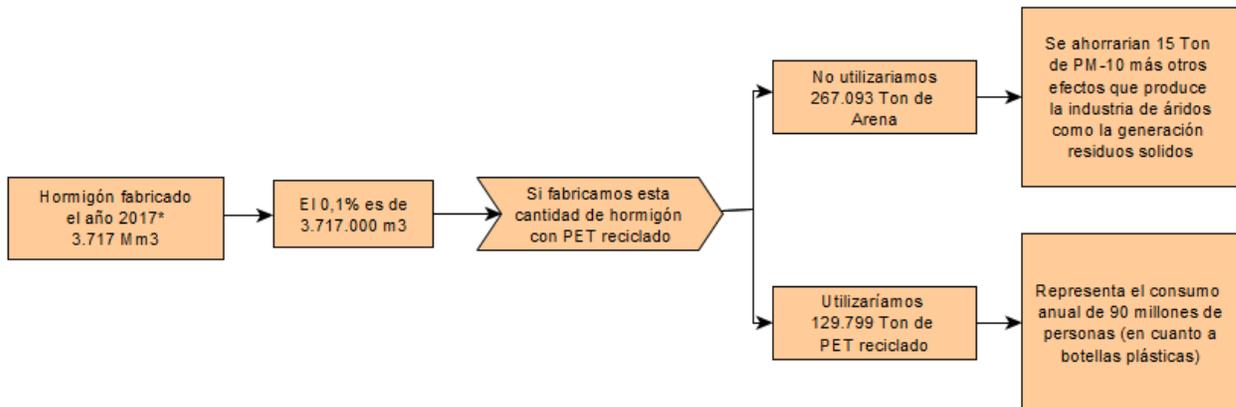


*Despachos según los datos de la CChC.

**Hormigón ocupado por m2 según Droguett (2008).

Nota: Se considera un hormigón con sustituto del 10% de agregados finos por PET reciclado.

Figura 45: Diagrama de beneficios ambientales que puede generar la utilización de PET en hormigones a nivel nacional (Elaboración propia).



*Según las estimaciones realizadas por Global Concrete report (2018).

Mm3: Millones de metros cúbicos.

Nota: Se considera un hormigón con sustituto del 10% de agregados finos por PET reciclado.

Figura 46: Diagrama de beneficios ambientales que puede generar la utilización de PET en hormigones a nivel mundial (Elaboración propia).

4.4. Posibles usos

En los diferentes estudios se ha mostrado que este material es capaz de alcanzar la misma resistencia a compresión y flexión que un hormigón convencional, sin embargo, siempre se debe tener limitaciones, como por ejemplo, no utilizarlo en construcciones que requieran calentar el hormigón a temperaturas elevadas, ya que el punto de fusión del PET bordea los 250°C, y el cambio de estado de este material impediría el correcto funcionamiento del concreto e incluso, la activación del cemento o el fraguado del hormigón.

Uno de los usos sería como material para la construcción de viviendas, dado que adicionalmente Albano et al. (2009), Ferrerira et al. (2012) y Saikia et al. (2014), mostraron que la utilización de PET en la mezcla de hormigón le otorga al material mejoras en cuanto a la resistencia al fuego. Esta cualidad, podría ser, además, un incentivo en la certificación de vivienda sustentable que otorga el Gobierno de Chile, el cual define esta certificación como *“un sistema voluntario de evaluación de viviendas nuevas que valora diferentes aspectos del desempeño ambiental, económico y social, durante las etapas de diseño y construcción”*.



Figura 47: Auto-construcción utilizando ladrillos y placas de ladrillos con plástico reciclado (Gaggino, 2008).

En el manual de aplicación de la certificación vivienda sustentable, lanzado por el ministerio de vivienda y urbanismo el año 2019, se establecen seis categorías a evaluar: salud y bienestar, energía, agua, materiales y residuos, impacto ambiental y entorno inmediato. La categoría que favorece la utilización de hormigón con PET reciclado corresponde a la de materiales y residuos, la cual busca *“fomentar la selección, especificación y adquisición de materiales y productos de construcción que proporcionen información acerca de su ciclo de vida (ACV) y sus potenciales impactos ambientales”*.

Como se vio en la parte anterior, es posible calcular el ACV de un bloque de hormigón, y dicho procedimiento podría también calcularse para la fabricación de muros de hormigón con plástico reciclado para viviendas sustentables favoreciendo la obtención de puntaje para el certificado.

Se debe tener en cuenta que en este trabajo se cuantifica el precio de un hormigón G25 dado que es el grado sobre el cual se tenía más información, sin embargo y tal como se explicó en el Capítulo 3, a se puede optimar la mezcla a modo de disminuir la resistencia y aumentar la cantidad de PET agregado, de esta forma, si se llegase a fabricar el concreto en grandes cantidades, sería más rentable tener la maquinaria especializada y de esa forma reducir los costos.

Otro de los usos que puede tener este material es en la industria de prefabricados de hormigón. Actualmente hay proyectos a nivel mundial que buscar fomentar nuevas tecnologías y estrategias para el desarrollo de elementos para la construcción, como lo es el caso del proyecto RE4. Dicho proyecto consiste en la investigación para el desarrollo de prefabricados con un alto porcentaje de materiales reciclados y estructuras reutilizadas de edificios derribados o como se mencionó anteriormente en este documento, de RCD.

Esta investigación cuenta con la colaboración de 13 instituciones del mundo de la ciencia e industria y está financiado por la Unión Europea bajo la iniciativa Horizonte 2020. El objetivo de este proyecto es el de diseñar elementos constructivos como prefabricados de hormigón de alta calidad que sean portantes y no portantes, basándose en el uso de hasta un 65% de masa de material de construcción reciclado y de RCD reutilizables. Después de varios estudios por parte del conglomerado, se llegó al desarrollo de prefabricados de hormigón de efecto térmico para cerramiento de edificios, tanto en construcciones nuevas como de saneamiento, lo cual ofrece una construcción rápida, reducción en las piezas de hormigón y en el peso total del elemento (véase Figura 48).



Figura 48: Hormigonado de elementos sándwich con una base de RCD y productos finales (fábrica de hormigón Creagh) (PHI, 2020).

Dentro del proyecto también se contemplaba la construcción de dos modelos de edificios a escala real con dos plantas cada uno. Ambos modelos se fabricaron en equipos de ensayos para medir diferentes propiedades, en el primero se midió el rendimiento de los elementos de fachada extrusada bajo condiciones climáticas reales cuyas pruebas fueron realizadas en España e Irlanda del Norte, mientras que el segundo se utilizó para medir la respuesta ante comportamiento sísmico utilizando una mesa de comprobación sísmica. Los resultados obtenidos indicaron que los elementos prefabricados presentaban el mismo rendimiento que los elementos convencionales y eran térmicamente eficientes.



Figura 49: Edificio de demostración: el nuevo centro de I+D de Creagh; primera y última fase de construcción (PHI, 2020).

Sin embargo, se debe tener en consideración que se tomaron una serie de medidas para que el producto final tuviera las propiedades esperadas, como, por ejemplo:

- El desarrollo de un sistema de clasificación para los materiales reciclados procedentes de RCD, así como procesos digitales o asistidos por robots.
- Se tuvieron que realizar varias pruebas de dosificación, dado que observaron que un aumento significativo en el uso de RCD en lugar de áridos naturales también aumenta el contenido de cemento y/o aditivos.
- Se requiere una actualización en las normas existentes para áridos reciclados, ya que actualmente, estos se encuentran clasificados por la EN206:2013 en solo dos tipos A y B.

Capítulo 5

5. Conclusiones

5.1. Conclusiones generales y observaciones

La revisión bibliográfica de los artículos analizados en este trabajo da cuenta que es posible elaborar hormigones que contengan PET reciclado a modo tal de conseguir la misma resistencia que un hormigón convencional o una resistencia aceptable para su uso siempre y cuando esta no supere el reemplazo de áridos finos en un 20%.

Es posible caracterizar el PET como un árido, pero no mediante normativa nacional, es necesario utilizar, por ejemplo, normativa europea que nos permita clasificar propiedades importantes como lo son granulometría, densidad, absorción de agua o análisis químicos.

Se concluye que independiente de la resistencia que se busca conseguir, es posible sustituir desde el 0,5% al 20% de PET en la mezcla y conseguir los resultados esperados, dado que la gran limitante corresponde principalmente a la cantidad de cemento (que se incorpore entre 350 a 410 kg por metro cubico de hormigón), que este sea de alta resistencia o portland normal con adiciones, la relación A/C debe moverse entre 0,45 y 0,50 y finalmente se debe verificar el tipo de plástico reciclado con el que se cuenta, si este está triturado, en fibras, pulverizado o tratado térmicamente, ya que, el uso del primero puede generar problemas de trabajabilidad y se recomendaría el uso de plastificantes.

Tal como todos los autores indican, a medida que aumenta la cantidad de PET disminuye la resistencia a la compresión para mezclas elaboradas bajo una misma relación A/C o cantidad de cemento incorporado, se ha visto que para estas mezclas la resistencia baja hasta en un 45%. Otros estudios que dejan fijo uno o ambos de los parámetros mencionados anteriormente y solo varían la cantidad de PET o su forma, muestran una disminución de hasta un 65%, mientras que otros presentan un aumento de hasta un 28,7%. La relatividad de los estudios no permite definir la resistencia límite a dosificar, ya que, si bien la media corresponde a hormigones que presentan entre 20 y 30 MPa a la compresión, también hay otros autores que obtienen resultados positivos para hormigones de 40 y hasta 70 MPa a la compresión, sin embargo, siempre se debe tener en cuenta que no se recomendaría su uso en ambientes con elevadas temperaturas, puesto que, el punto de fusión del PET es menor que el de los áridos naturales.

Los hormigones ensayados a flexión presentan mejores resultados al compararlos con los resultados obtenidos frente a ensayos de compresión, ya que, las mezclas con agregado PET como sustituto, presentan una diferencia promedio de 0,1 MPa por encima del hormigón convencional, e incluso, se observan muestras que mejoran en un 85,5% respecto a una mezcla sin plástico. El módulo de elasticidad puede disminuir hasta en un 70%, debido a que el árido natural y el plástico poseen diferentes densidades, sin embargo,

el 97% de los casos de estudio estaría dentro del rango de valores que poseen los hormigones convencionales. Se debe tener en consideración que la absorción de agua presenta valores diferidos, es decir, puede disminuir en un 9% y aumentar hasta un 56% respecto a un hormigón convencional, ya que, depende de la homogenización de los materiales, lo cual radica íntegramente en el tipo de PET reciclado utilizado, un plástico triturado mediante molienda puede generar problemas de trabajabilidad (y adicionalmente menores asentamientos), al momento de fraguar este hormigón no queda bien compactado y por lo mismo la absorción aumenta, los estudios analizados indican además, que este problema puede provocar un aumento en la carbonatación y ataque de cloruros. Adicionalmente, se puede mencionar que varios estudios indican una mejora en la resistencia a la abrasión, pero no es posible cuantificarlo ya que se utilizan diferentes métodos de medición.

Todos los materiales y factores mencionados anteriormente pueden combinarse de distintas formas para elaborar mezclas que cumplan con diferentes resistencias. Utilizando esta información en conjunto con los ensayos elaborados para conseguir una resistencia específica, se toma como porcentaje de reemplazo óptimo (con tal de considerar aceptable la resistencia a la compresión del hormigón) el reemplazo del 10% de PET por árido fino, considerando que este se encuentra simplemente triturado.

En términos de costos, un metro cúbico de hormigón elaborado sustituyendo en un 5% y un 10% los agregados naturales por PET, es de \$3.513 y \$7.190 más caro que uno convencional respectivamente, debido principalmente, a que se considera la compra del plástico reciclado y triturado. El costo se puede ver compensado por la cantidad de plástico reutilizado, si se tomara una política pública que incentivase el uso de este material fabricándose, por ejemplo, el 0,1% del hormigón producido el año 2019 en el país, se utilizarían 304 toneladas de PET lo que representa el consumo anual de 210.423 personas.

La industria del reciclaje de botellas plásticas aún no se desarrolla completamente en el país, por lo que se considera como proyecto a futuro colaborar con pymes que hoy en día se dedican a la recolección y elaboración de otro tipo de objetos con el PET reciclado, a modo de contribuir con el crecimiento colectivo. Se debe destacar, adicionalmente, que los precios calculados se realizaron al por menor, por lo que, si este productivo se realiza en grandes cantidades, el valor total del hormigón con plástico reciclado disminuiría.

Varios han sido los estudios e investigaciones alrededor del mundo, sin embargo solo 25 de ellos han sido analizados en este trabajo sobre la utilización de plásticos reciclados en hormigones, morteros y otros elementos utilizados en la construcción, dado que la contaminación producida por la generación de este material afecta cada vez más el habitat natural de fauna marítima y silvestre, además de comunidades con menos recursos, y siendo la industria de la construcción la tercera más importante en cuanto a la contribución del crecimiento del PIB (Banco Central de Chile, 2019), se debiera aportar con el desarrollo de nuevos materiales y que de forma adicional, ayude a la descontaminación o reducción de residuos.

Respecto a la reducción de residuos, es necesario destacar que Chile hoy en día no cuenta con normativas para la utilización de, por ejemplo, áridos reciclados (lo que contribuiría a la reutilización de residuos de demolición) o áridos artificiales, los cuales son utilizados en varios países del mundo para la elaboración de hormigones estructurales, no estructurales y pavimentos.

Finalmente, es imprescindible avanzar en la utilización de nuevos materiales, puesto que, la extracción constante de materia prima no solo afecta el equilibrio natural de ciertas zonas, sino que también, afecta en la salud de las personas que trabajan, por ejemplo, en las mismas plantas de áridos debido al material particulado no controlado.

5.2. Futuras líneas de investigación

Se plantea como futuras líneas de investigación la fabricación de este hormigón y la caracterización del PET como un árido, donde ambas deben ser ensayadas bajo las normativas planteadas en el capítulo 3.4 de este trabajo, hasta la fecha Chile no cuenta con normas que regulen los áridos no naturales.

Adicionalmente, se plantean estudios relacionados a la durabilidad de este hormigón, dado que si bien, se ha visto que el plástico es capaz de durar bastantes años en el medio sin degradarse, este sí pierde parte de sus propiedades mecánicas.

Bibliografía

- [1] ACHS (2001). *Guía para el Control y Prevención de la Contaminación Industrial- Rubro Productos de Cementos y Hormigón*. Recuperado de <https://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion/CentrodeFichas/Documents/control-y-prevencion-de-riesgos-en-productos-de-cemento-y-hormigon.pdf>
- [2] American Concrete Institute (2013). *CT-13: ACI Concrete Terminology*. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.
- [3] American Concrete Institute (2011). *318-11: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.
- [4] American Concrete Institute (1991). *211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.
- [5] CITECUBB (2017). *CONSULTORÍA ESTUDIO: “Caracterización de residuos de la construcción, 1ª etapa: Desarrollo, validación y calibración de metodología, aplicado a casos piloto” (CÓDIGO 14 PEDN 35718-2)*. Recuperado de [http://construye2025.cl/rcd/wp-content/uploads/2019/01/UBB_Informe_Ejecutivo_Publico_\(Mayo_2018\).pdf](http://construye2025.cl/rcd/wp-content/uploads/2019/01/UBB_Informe_Ejecutivo_Publico_(Mayo_2018).pdf)
- [6] CDT (2018). *INFORME FINAL: “Diagnóstico gestión de residuos en la construcción” (CODIGO 14 PEDN 35718-2), pp. 18*. Recuperado de <https://construye2025.cl/download/179/estudios/4807/diagnostico-sobre-la-gestion-de-residuos-de-las-empresas-del-sector-construccion.pdf>
- [7] CONAMA (2010). *Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile*. Recuperado de http://www.hidronor.cl/pdf/1_Primer_Reporte_del_Manejo_de_Residuos_S%C3%B3lidos_en_Chile_Conama_2010.pdf
- [8] Gaggino, R. (2008). *Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la autoconstrucción*. Revista INVI, 23(63). Recuperado de <http://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/446/955>
- [9] García, A., Amado, M., Casados, M. & Brito, R. (2013). *Madera plástica con PET de post consumo y paja de trigo*. *Ciencia y Tecnología*, 13, 25-40. Recuperado de <https://pub.palermo.edu/ojs/index.php/cyt/article/view/30>

- [10] Instituto Nacional de Normalización. (2013). NCh163.Of2013. Áridos para Morteros y Hormigones - Requisitos. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [11] Instituto Nacional de Normalización. (2016). NCh170.Of2017. Hormigones – Requisitos Generales. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [12] Instituto Nacional de Normalización. (1968). NCh148.Of1968. Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [13] Instituto Nacional de Normalización. (2009). NCh1017.Of2009. Hormigón – Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [14] Instituto Nacional de Normalización. (2009). NCh1018.Of2009. Hormigón – Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [15] Instituto Nacional de Normalización. (2009). NCh1019.Of2009. Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento del cono de Abrams. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [16] Instituto Nacional de Normalización. (2009). NCh1037.Of2009. Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [17] Instituto Nacional de Normalización. (2009). NCh1038.Of2009. Hormigón – Ensayo de tracción por flexión. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [18] Instituto Nacional de Normalización. (2009). NCh1564.Of2009. Hormigón – Determinación de la densidad aparente del hormigón fresco. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [19] Instituto Nacional de Normalización. (1986). NCh1789.Of1986. Hormigón – Determinación de la uniformidad obtenida en el mezclado del hormigón fresco. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [20] Instituto Nacional de Normalización. (1992). NCh2184.Of1992. Hormigón y mortero – Determinación del contenido de aire. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).

- [21] Instituto Nacional de Normalización. (2009). NCh2262.Of2009. Hormigón y mortero - Determinación de la permeabilidad al agua – Método de la penetración de agua bajo presión. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [22] Instituto Nacional de Normalización. (2009). NCh165.Of2009. Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [23] Instituto Nacional de Normalización. (2008). NCh1116.Of2008. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [24] Instituto Nacional de Normalización. (1977). NCh1223.Of1977. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de material fino menos a 0,008 mm. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [25] Instituto Nacional de Normalización. (2009). NCh1239.Of2009. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [26] Instituto Nacional de Normalización. (2010). NCh1444.Of2010. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de cloruros y sulfatos. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización (CHILE).
- [27] Khanna, A., Singla, S., Jain, Y. (2015). *Investigation of the Mechanical Properties of Concrete by Replacing Fine Aggregates Partially with Pulverized Waste Plastic Bottle Fibers*, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 5(6), 128-134. Recuperado de https://ijetae.com/files/Volume5Issue6/IJETAE_0615_22.pdf
- [28] Pelisser, F., Klegues, O., Gleize, P., Ramos, H. (2012). *Mechanical Properties of Recycled PET Fibers in Concrete*, *Materials Research*, 15(4), 1-8. Recuperado de http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392012000400029
- [29] Vali, M., Assadi, S. (2017). *PET Bottle Waste as a Supplement to Concrete Fine Aggregate*, *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 8(1), 558-568. Recuperado de http://www.iaeme.com/MasterAdmin/uploadfolder/IJCIET_08_01_063-2/IJCIET_08_01_063-2.pdf

- [30] CENEM (2017). Estadísticas de packaging: producción de envases PET. Recuperado de <http://cenem.cl/newsletter/junio2017/detalle-28.php> (visitado el 03 Abril 2020)
- [31] Webb, H., Arnott, J., Crawford, R., Ivanova, E. (2012). *Plastic Degradation and Its Enviromental Implications with Special Reference to Poly(ethylene terephthalate), Polymers*, 5, 1-18, doi: 10.3390/polym5010001
- [32] PlasticsEurope (2019). *Plastics-The Facts 2019*. Recuperado de https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf (visitado el 03 Abril 2020)
- [33] Welle, Frank. (2017). *The Facts about PET*. doi: 10.13140/RG.2.1.3043.2726.
- [34] CocaCola Journey (s.f.) ¿En qué se puede convertir el PET reciclado?. Recuperado de <https://www.cocacoladechile.cl/historias/medio-ambiente-en-que-se-puede-convertir-el-pet-reciclado-> (visitado el 05 Abril 2020)
- [35] Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción* (pp. 33-57). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. ISBN 958-9322-82-4.
- [36] Callejas, J. (1977). *Cementos puzolánicos. Materiales de Construcción. Últimos avances*, 27(165), 23-36. <https://doi.org/10.3989/mc.1977.v27.i165>
- [37] Botero, E., Muñoz, L., Ossa, A., Romo, M. (2014). *Comportamiento mecánico del Polietileno Teraftalato (PET) y sus aplicaciones geotécnicas. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (70), 201-219. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302014000100020&lng=en&tlng=.
- [38] Arteaga, J. (2018). *Análisis del comportamiento de la base-cemento para pavimentos con adición de residuos PET reciclado* (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- [39] Berrío, A. (2017) *Diseño y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica tipo MSC-19 con incorporación de Tereftalato de Polietileno reciclado como agregado constitutivo* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/63583/>
- [40] Rahman, W. M. N. W. A., Wahab, A. F. A. (2013). *Green Pavement using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt. Procedia Engineering*, (53), 124-128. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.018>.

- [41] Ramadevi, K., Manju, R. (2012). *Experimental Investigation on the Properties of Concrete With Plastic PET (Bottle) Fibres as Fine Aggregates*. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(6), 42-46. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/287656238_Experimental_Investigation_on_the_Properties_of_Concrete_With_Plastic_PET_Bottle_Fibres_as_Fine_Aggregates
- [42] Akçaözoglu, S., Atis, C. (2011). *Effect of Granulated Blast Furnace Slag and Fly ash addition on the strength properties of lightweight mortars containing waste PET aggregates*. *Construction and Building Materials*, 25(10), 4052-4058. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.042>
- [43] Choi, Y.W., Moon, D.J., Kim, Y.J., Lachemi, M. (2009). *Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles*. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2829-2835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>
- [44] Orozco, M., Avila, Y., Restrepo, S., Parody, A. (2018). *Factores influyentes en la calidad del concreto: una encuesta a los actores relevantes de la industria de la construcción*. *Revista Ingeniería de construcción*, 33(2), 161-172. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000200161>
- [45] Sotelo, P., Alvarez, J., Quecholac-Piña, X., Velasco, M., Valdemar, R., Villavicencio, M., Vazquez, A. (2019). *Degradación & Biodegradación de Plásticos RESUMEN EJECUTIVO | 2018*. doi: 10.13140/RG.2.2.21504.48642.
- [46] Molina, J., González, C. (27 de marzo de 2019). *Desafío para la Ley REP: En Chile se recicla el 8% del plástico, y solo un 17% de ello proviene de los hogares*. *País Circular*. Recuperado de <https://www.paiscircular.cl/industria/desafio-para-la-ley-rep-en-chile-se-recicla-apenas-el-8-del-plastico-y-solo-un-17-proviene-de-los-hogares/>
- [47] Infante-Alcalde, J., Valderrama-Ulloa, C. (2019). *Análisis Técnico, Económico y Medioambiental de la Fabricación de Bloques de Hormigón con Polietileno Tereftalato Reciclado (PET)*. *Información Tecnológica*, 30(5), 25-36. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000500025>
- [48] Beltran, J., Ferreira, A. (2018). *Implementación de material plástico reciclado, (PET) para la elaboración de un bloque de hormigón* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- [49] CDT (2020). *Gestión de residuos para mejorar la productividad en la empresa*. *Corporación de Desarrollo Tecnológico, edición técnica N°15*.

- [50] Dhir, R., Paine, K., Brito, J. (2011). *Use of recycled and manufactured aggregates in concrete: An overview. New Developments in Concrete Construction*. 157-182.
- [51] MINVU (2019). *Manual de aplicación de la certificación vivienda sustentable*. Santiago, Chile. División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional.
- [52] Choi, Y.-W., Moon, D.-J., Chung, J.-S., & Cho, S.-K. (2005). *Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. Cement and Concrete Research*, 35(4), 776–781. doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.014
- [53] Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., & Gutiérrez, A. (2009). *Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. Waste Management*, 29(10), 2707–2716. doi:10.1016/j.wasman.2009.05.007
- [54] Frigione, M. (2010). *Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. Waste Management*, 30(6), 1101–1106. doi:10.1016/j.wasman.2010.01.030
- [55] Galvão, J. C. A., Portella, K. F., Joukoski, A., Mendes, R., & Ferreira, E. S. (2011). *Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. Construction and Building Materials*, 25(2), 1049–1055. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.073
- [56] Ferreira, L., de Brito, J., & Saikia, N. (2012). *Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. Construction and Building Materials*, 36, 196–204. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.098
- [57] Silva, R. V., de Brito, J., & Saikia, N. (2013). *Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23–31. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017
- [58] Juki, M. I., Awang, M., Annas, M. M. K., Boon, K. H., Othman, N., binti Abdul Kadir, A., ... Khalid, F. S. (2013). *Relationship between Compressive, Splitting Tensile and Flexural Strength of Concrete Containing Granulated Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Bottles as Fine Aggregate. Advanced Materials Research*, 795, 356–359. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.795.356
- [59] Saikia, N., & de Brito, J. (2014). *Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. Construction and Building Materials*, 52, 236–244. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049

- [60] Nibudey, R. N., Nagarnaik, P.B., Parbat, D. K. & Pande, A. M. (2013). *A model for compressive strength of PET fiber reinforced concrete*. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 2(12), 367-372.
- [61] Asociación Española de Normalización y Certificación (2012). UNE-EN933-1:2012 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. Madrid, España.
- [62] Asociación Española de Normalización y Certificación (2014). UNE-EN1097-6:2014 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. Madrid, España.
- [63] Asociación Española de Normalización y Certificación (1999). UNE-EN 1097-3:1999 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad. Madrid, España.
- [64] Asociación Española de Normalización y Certificación (2013). UNE-EN1744-1:2010+A1:2013 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico. Madrid, España.
- [65] El potencial sin explotar del reciclaje en Chile (21 de septiembre de 2019). Desafío Tierra. Recuperado de [https://www.futuro360.com/desafiotierra/el-potencial-sin-explotar-del-reciclaje-en-chile_20190921/#:~:text=Si%20consideramos%20una%20base%20de,230%20e1%20mixto%20\(polipropileno\).](https://www.futuro360.com/desafiotierra/el-potencial-sin-explotar-del-reciclaje-en-chile_20190921/#:~:text=Si%20consideramos%20una%20base%20de,230%20e1%20mixto%20(polipropileno).)
- [66] Blanco, U. (17 de mayo de 2018). ¿Cuántas botellas de PET necesitas reciclar para ganar un salario mínimo?. *El Financiero*. Recuperado de <https://www.elfinanciero.com.mx/economia/cuantas-botellas-de-pet-necesitas-reciclar-para-ganar-un-salario-minimo>
- [67] National Ready Mixed Concrete Association (2017). *2017 President's report*. Silver Spring, USA.
- [68] Top 25 Global Concrete Producers (2018). *Global Cement*, pp. 1-30. Recuperado de https://www.proids-online.com/products/reports/global-concrete-report-2018?_ga=2.69339929.8009786.1595786897-1125531698.1591898426
- [69] ASTM C31 / C31M-19a, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org

- [70] ASTM C192 / C192M-19, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org
- [71] ASTM C143 / C143M-20, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org
- [72] ASTM C39 / C39M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org
- [73] ASTM C78 / C78M-18, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
- [74] ASTM C138 / C138M-17a, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org
- [75] ASTM C231 / C231M-17a, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org
- [76] ASTM C1585-13, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org
- [77] Droguett, A. (2008). *Análisis comparativo de vulnerabilidad y costo entre edificios de marcos y muros con una misma superficie de planta* (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile, Santiago, Chile, pp. 106-107.
- [78] Carmona, F. (2010). *Estimación de la energía consumida en la construcción de obra gruesa de 3 edificios de altura media en la ciudad de Santiago de Chile* (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile, Santiago, Chile, pp. 24.
- [79] Departamento del Interior de los E.E.U.U., (1952). *Manual Americano del Hormigón*, Dossat S.A., Madrid, pp. 1-25.
- [80] Rojas, M. (2012). *Resistencias mecánicas de morteros livianos confeccionados con virutas de polietileno tereftalato obtenidas de la molienda de botellas desechables* (Tesis de Pregrado). Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile.

[81] Banco Central de Chile (2019). Cuentas Nacionales de Chile – Evolución de la actividad económica tercer trimestre de 2019, pp. 5. Recuperado de https://www.bcentral.cl/documents/33528/762418/Cuentas_nacionales_tercer_trimestre_2019.pdf/a221d712-b2ed-8a52-530f-2b8c24665f61?t=1574168724037

ANEXO A

Resumen detallado de los estudios analizados

Estudio	Adición PET	Tipo	Forma PET	Tamaño [mm]	$D_n \max.^a$ [mm]	Cemento	Adición	Tipo de probeta ^d
Choi et al., (2005)	Reemplazo	Hormigón	Granular	5-15	20	OPC	Escoria de alto horno	cilíndrico
Choi et al., (2009)	Reemplazo	Hormigón	Granular	5 - 15	20	OPC	-	cilíndrico
Albano et al., (2009)	Reemplazo	Hormigón	Irregular	2,6 y 11,4	20	OPC	-	cilíndrico
Frigione (2010)	Reemplazo	Hormigón	Irregular	0,1 - 5	20	OPC I	-	cubico
Galvao et al., (2011)	Reemplazo	Hormigón	n.i.	12,5	9,5	CPII-Z32	Puzolana	cilíndrico
Ramadevi et al., (2012)	Reemplazo	Hormigón	Fibra	n.i.	20	OPC 53 ^b	-	cubico
Pelisser et al., (2012)	Refuerzo	Hormigón	Fibra	10, 15 y 20	19	PC de alta resistencia temprana	-	n.i.
Ferreira et al., (2012)	Reemplazo	Hormigón	Irregular y granulada	2 - 13	n.i.	CEM IIA-L 42,5 R	Caliza	cubico
Rojas (2012)	Reemplazo	Mortero	Granular	0 - 5	4,75	PC alta resistencia	Puzolana	cilíndrico
Juki et al., (2013)	Reemplazo	Hormigón	Granular	0 - 5	20	OPC	-	cubico
Nibudey et al., (2013)	Refuerzo	Hormigón	Fibra	25	20	OPC	Puzolana	cubico
Silva et al., (2013)	Reemplazo	Hormigón	Irregular y granulada	2 - 11,2 y 1 - 4	n.i. - 20	CEM IIA-L 42,5 R	Caliza	cubico
Saikia et al., (2014)	Reemplazo	Hormigón	Irregular y granulada	0 - 11,2	n.i. - 20	CEM IIA-L 42,5 R	Caliza	cubico
Khanna et al., (2015)	Reemplazo	Hormigón	Fibra	0 - 4,75	20	OPC 43 ^b	Ceniza volante	cubico

Continuación

Vali et al., (2017)	Reemplazo	Hormigón	n.i.	n.i.	20	OPC 53 ^b	-	cubico
Beltran et al., (2018)	Reemplazo	Hormigón	Pulverizada	-	10	n.i	n.i	cilindro
Infante et al., (2019)	Reemplazo	Hormigón	n.i,	n.i,	n.i.	OPC ^c	Puzolana ^c	cilíndrico

n.i: No se informa.

OPC: Cemento portland común.

^a: Tamaño máximo nominal del agregado grueso.

^b: Clasificación de cemento según la normativa de India.

^c: El estudio no lo informa, pero dado que se realizó en Chile, se asume que el cemento utilizado fue portland puzolánico ya que es el más utilizado en el país.

^a: Para ensayo a la compresión.

ANEXO B

Detalle de cada estudio (relación A/C, cantidad de cemento, asentamiento, % PET incorporado, resistencia a la compresión, flexión y tracción, módulo de elasticidad y absorción de agua), respecto a su parámetro de referencia.

Estudio	Datos				Resistencia			Otros ensayos		Parámetro de referencia
	Relación A/C	Cemento [kg]	Cono [cm]	% PET	Compresión [MPa]	Flexión [MPa]	Tracción [MPa]	ME [GPa]	Abs. de agua [%]	
Choi et al., (2005)	0,53	-	10	0%	31,5	-	3,27	23,5	-	Con respecto a muestra patrón
	0,53	-	15,3	25%	29,7	-	2,65	23	-	
	0,53	-	19,9	50%	26,3	-	2,25	21,2	-	
	0,53	-	22,3	75%	21,8	-	2,04	18,5	-	
	0,49	-	10,5	0%	34,6	-	3,27	23,3	-	
	0,49	-	15,4	25%	33,7	-	2,76	22,8	-	
	0,49	-	18	50%	29,1	-	2,35	18,1	-	
	0,49	-	21,4	75%	23,2	-	1,94	16,7	-	
	0,45	-	13,5	0%	37,2	-	3,32	25,5	-	
	0,45	-	16,9	25%	33,8	-	2,8	18,7	-	
	0,45	-	18,4	50%	31,8	-	2,55	17,3	-	
	0,45	-	20,5	75%	24,9	-	2,04	15,6	-	

Estudio	Datos				Resistencia			Otros ensayos		Parámetro de referencia
	Relación A/C	Cemento [Kg]	Cono [cm]	% PET	Compresión [MPa]	Flexión [MPa]	Tracción [MPa]	ME [GPa]	Abs. de agua [%]	
Choi et al., (2009)	0,53	336	10	0%	31,88	-	-	-	-	Con respecto a muestra patrón
	0,53	336	15,3	25%	30,00	-	-	-	-	
	0,53	336	19,9	50%	26,88	-	-	-	-	
	0,53	336	22,3	75%	22,50	-	-	-	-	
	0,49	367	10,5	0%	36,3	-	-	-	-	
	0,49	367	15,4	25%	35,0	-	-	-	-	
	0,49	367	18	50%	29,7	-	-	-	-	
	0,49	367	21,4	75%	24,4	-	-	-	-	
	0,45	402	13,5	0%	38,1	-	-	-	-	
	0,45	402	16,9	25%	33,8	-	-	-	-	
	0,45	402	18,4	50%	32,5	-	-	-	-	
	0,45	402	20,5	75%	27,5	-	-	-	-	
Albano et al., (2009)	0,5	24,1	8,7	0%	27,81	4,21	2,78	28,29	6,00	Con respecto a muestra patrón
	0,5	24,1	8,4	10%	22,5	4,59	2,5	22,5	7,00	
	0,5	24,1	5	20%	18,43	4,06	2,21	16,07	9,00	
	0,6	19,1	7,9	0%	21,31	3,81	2,35	22,5	8,00	
	0,6	19,1	5,3	10%	18,15	3,5	2,17	18,57	7,16	
	0,6	19,1	2	20%	12,89	2,81	1,75	16,07	9,33	

Nota: Los datos de Choi et al., (2009) y Albano et al., (2009) se obtuvieron a partir de gráficos.

Estudio	Datos				Resistencia			Otros ensayos		Parámetro de referencia
	Relación A/C	Cemento [Kg]	Cono [cm]	% PET	Compresión [MPa]	Flexión [MPa]	Tracción [MPa]	ME [GPa]	Abs. de agua [%]	
Frigione (2010)	0,45	300	60 s*	5%	68	-	6,1	-	-	Con respecto a muestra patrón
	0,45	300	62 s*	5%	67,5	-	6	-	-	
	0,55	300	15 s*	5%	41,5	-	4,2	-	-	
	0,55	300	15 s*	5%	40,7	-	4,1	-	-	
	0,45	400	35 s*	5%	70	-	6,3	-	-	
	0,45	400	37 s*	5%	69,7	-	6,3	-	-	
	0,55	400	46%**	5%	44	-	4,7	-	-	
	0,55	400	49%**	5%	43,2	-	4,6	-	-	
Galvao et al., (2011)	0,45	389	-	0,0%	34,2	-	-	-	-	Con respecto a muestra patrón
	0,45	389	-	0,5%	37,5	-	-	-	-	
	0,45	389	-	1,0%	39,5	-	-	-	-	
	0,45	389	-	2,5%	35,9	-	-	-	-	
	0,45	389	-	5,0%	34,2	-	-	-	-	
	0,45	389	-	7,5%	29,1	-	-	-	-	
Ramadevi et al., (2012)	0,45	425,78	-	0,00%	31,1	3,17	1,88	-	-	M25
	0,45	425,78	-	0,50%	32,9	4,46	1,99	-	-	
	0,45	425,78	-	1%	40,0	5,17	2,05	-	-	
	0,45	425,78	-	2%	40,0	5,67	2,12	-	-	
	0,45	425,78	-	3%	38,8	5,88	2,08	-	-	
	0,45	425,78	-	6%	38,125	5,8	2,05	-	-	

*Ensayo mediante VeBe test (EN12350-3) medido en segundos.

**Ensayo mediante prueba de flujo (EN12350-5) medido en porcentaje.

Nota: Los datos de Galvao et al., (2011) y Ramadevi et al., (2012) se obtuvieron a partir de gráficos.

Estudio	Datos				Resistencia			Otros ensayos		Parámetro de referencia
	Relación A/C	Cemento [Kg]	Cono [cm]	% PET	Compresión [MPa]	Flexión [MPa]	Tracción [MPa]	ME [GPa]	Abs. de agua [%]	
Pelisser et al., (2012)	0,62	-	10	0%	29,23	3,75	-	24,93	-	Con respecto a muestra patrón
	0,62	-	15,5	0,05%	28,35	4,3	-	25,05	-	
	0,62	-	7	0,18%	27,04	4,26	-	22,92	-	
	0,62	-	5	0,3%	29,52	4,47	-	24,2	-	
Ferreira et al., (2012)	0,53	350	13	0,0%	36	-	2,92	33	-	C30/37
	0,61	350	13	7,5%	20	-	1,92	23,5	-	
	0,53	350	13	7,5%	35	-	2,64	29,5	-	
	0,51	350	13	15,0%	32	-	2,21	27,5	-	
	0,56	350	13	7,5%	24	-	2,10	27,5	-	
	0,6	350	13	15,0%	20	-	1,57	18	-	
Juki et al., (2013)	0,55	295	-	0%	26,69	4,99	3,52	30	-	Con respecto a muestra patrón
	0,55	295	-	25%	22,83	4,75	2,99	23	-	
	0,55	295	-	50%	20,37	3,8	2,38	15	-	
	0,55	295	-	75%	15,2	2,61	2,02	9	-	

Nota: Los datos de Ferreira et al., (2012) se obtuvieron a partir de gráficos.

Estudio	Datos				Resistencia			Otros ensayos		Parámetro de referencia
	Relación A/C	Cemento [Kg]	Cono [cm]	% PET	Compresión [MPa]	Flexión [MPa]	Tracción [MPa]	ME [GPa]	Abs. de agua [%]	
Nibudey et al., (2013)	0,52	-	35	0%	28,15	-	-	-	-	M20
	0,52	-	35	0,5%	28,44	-	-	-	-	
	0,52	-	35	1,0%	29,63	-	-	-	-	
	0,52	-	35	1,5%	28,44	-	-	-	-	
	0,52	-	35	2,0%	26,37	-	-	-	-	
	0,52	-	35	2,5%	24,3	-	-	-	-	
	0,52	-	35	3,0%	22,81	-	-	-	-	
	0,52	-	50	0,5%	29,63	-	-	-	-	
	0,52	-	50	1,0%	30,22	-	-	-	-	
	0,52	-	50	1,5%	28,74	-	-	-	-	
	0,52	-	50	2,0%	25,78	-	-	-	-	
	0,52	-	50	2,5%	23,41	-	-	-	-	
	0,52	-	50	3,0%	20,44	-	-	-	-	
	0,48	-	35	0%	41,19	-	-	-	-	M30
	0,48	-	35	0,5%	41,78	-	-	-	-	
	0,48	-	35	1,0%	42,96	-	-	-	-	
	0,48	-	35	1,5%	42,67	-	-	-	-	
	0,48	-	35	2,0%	40,3	-	-	-	-	
	0,48	-	35	2,5%	34,97	-	-	-	-	
	0,48	-	35	3,0%	31,41	-	-	-	-	
	0,48	-	50	0,5%	42,97	-	-	-	-	
	0,48	-	50	1,0%	43,85	-	-	-	-	
0,48	-	50	1,5%	41,78	-	-	-	-		
0,48	-	50	2,0%	39,11	-	-	-	-		
0,48	-	50	2,5%	35,85	-	-	-	-		
0,48	-	50	3,0%	33,19	-	-	-	-		

Estudio	Datos				Resistencia			Otros ensayos		Parámetro de referencia
	Relación A/C	Cemento [Kg]	Cono [cm]	% PET	Compresión [MPa]	Flexión [MPa]	Tracción [MPa]	ME [GPa]	Abs. de agua [%]	
Silva et la, (2013)	0,54	350	13,3	0,0%	36,7	-	-	-	13,28	Con respecto a muestra patrón
	0,61	350	13,5	7,5%	19,7	-	-	-	16,17	
	0,53	350	13,1	7,5%	35,3	-	-	-	12,86	
	0,52	350	13	15,0%	31,9	-	-	-	13,49	
	0,56	350	13,9	7,5%	24,4	-	-	-	12,82	
	0,61	350	14,1	15,0%	19,7	-	-	-	16,06	
Saikia et al., (2014)	0,53	350	12,7	0%	43	4,75	3,5	39,5	-	Con respecto a muestra patrón
	0,61	350	12	5%	31	3,9	2,45	31	-	
	0,65	350	12	10%	22	3,1	1,75	25,5	-	
	0,74	350	-	15%	15	2,4	1,25	16	-	
	0,57	350	12,2	5%	36	4,35	3,13	35	-	
	0,6	350	12,2	10%	31	3,75	2,65	30	-	
	0,64	350	12	15%	26	3	2,2	25	-	
	0,53	350	12,2	5%	38	4,5	3,27	36	-	
	0,52	350	12,2	10%	37	4,21	3,14	36	-	
0,52	350	13,2	15%	33,5	3,95	2,8	31	-		

Nota: Los datos de Saikia et al., (2013) se obtuvieron a partir de gráficos.

Estudio	Datos				Resistencia			Otros ensayos		Parámetro de referencia
	Relación A/C	Cemento [Kg]	Cono [cm]	% PET	Compresión [MPa]	Flexión [MPa]	Tracción [MPa]	ME [GPa]	Abs. de agua [%]	
Khanna et al., (2015)	0,45	361,9	-	0%	36,43	-	-	-	-	M30
	0,45	361,9	-	10%	35,8	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	20%	33,4	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	30%	32,5	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	40%	30,0	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	10%	35,1	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	20%	32,9	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	30%	31,6	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	40%	28,3	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	10%	33,2	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	20%	32,1	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	30%	30,5	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	40%	29,0	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	10%	31,7	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	20%	30,0	-	-	-	-	
	0,45	361,9	-	30%	28,8	-	-	-	-	
0,45	361,9	-	40%	27,5	-	-	-	-		

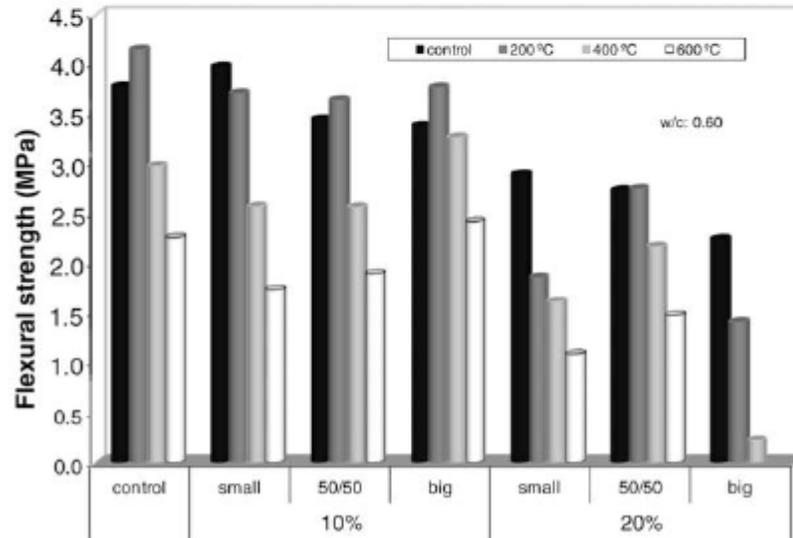
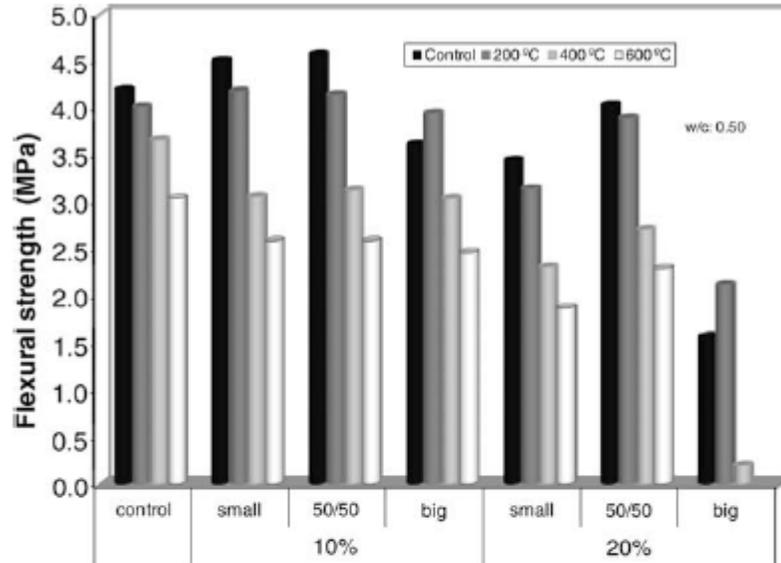
Estudio	Datos				Resistencia			Otros ensayos		Parámetro de referencia
	Relación A/C	Cemento [Kg]	Cono [cm]	% PET	Compresión [MPa]	Flexión [MPa]	Tracción [MPa]	ME [GPa]	Abs. de agua [%]	
Vali et al., (2017)	0,45	413	-	0%	26,9	3,17	4,9	-	-	M20
	0,45	413	-	5%	29,5	3,96	4,95	-	-	
	0,45	413	-	10%	30	4,96	5,14	-	-	
	0,45	413	-	15%	28,33	4,71	5,1	-	-	
	0,45	413	-	20%	27,38	4,42	4,98	-	-	
	0,45	413	-	0%	33,13	3,13	5,2	-	-	M25
	0,45	413	-	5%	34,06	3,96	5,25	-	-	
	0,45	413	-	10%	34,06	4,92	5,45	-	-	
	0,45	413	-	15%	32,19	4,71	5	-	-	
	0,45	413	-	20%	31,88	3,63	4,9	-	-	
	0,45	413	-	0%	31,7	3,09	4,6	-	-	M30
	0,45	413	-	5%	33,5	3,97	4,65	-	-	
	0,45	413	-	10%	31	4,21	5,1	-	-	
	0,45	413	-	15%	27,3	3,56	5	-	-	
	0,45	413	-	20%	25	3,12	4,9	-	-	

Nota: Los datos de Vali et al., (2017) se obtuvieron a partir de gráficos.

Estudio	Datos				Resistencia			Otros ensayos		Parámetro de referencia
	Relación A/C	Cemento [Kg]	Cono [cm]	% PET	Compresión [MPa]	Flexión [MPa]	Tracción [MPa]	ME [GPa]	Abs. de agua [%]	
Infante et al., (2019)	-	-	-	0%	26,1	4,83	-	-	7,81	Con respecto a muestra patrón
	-	-	-	5%	23,4	4	-	-	7,61	
	-	-	-	10%	24,1	4,13	-	-	7,26	
	-	-	-	15%	21,4	3,73	-	-	7,11	
	-	-	-	20%	21,7	3,6	-	-	7,52	

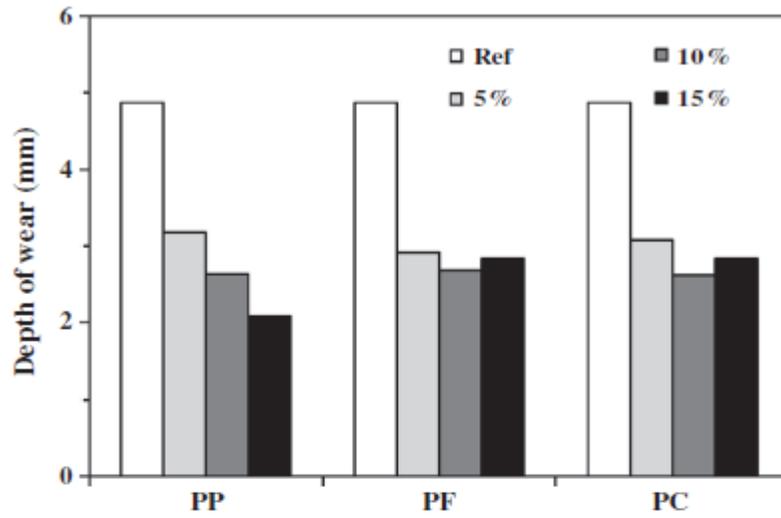
ANEXO C

Resistencia a la flexión de hormigón con agregado PET a relaciones A/C de 0,5 y 0,6 expuestos a diferentes temperaturas (Albano et al., 2009).

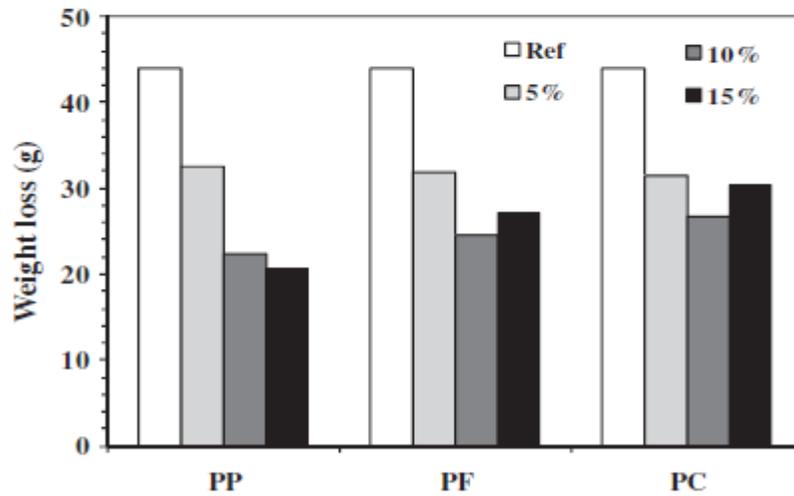


ANEXO D

Profundidad de desgaste y pérdida de peso del hormigón con varios porcentajes de sustitución de áridos naturales por PET después de la prueba de resistencia a la abrasión (Saikia et al., 2014).



(A) Depth of wear



(B) Weight loss

ANEXO E

Profundidad de desgaste de acuerdo con las diferentes condiciones de curado después de la prueba de resistencia a la abrasión (Ferreira et al., 2012).

