



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

# **Estudio de durabilidad de hormigones con agregado parcial de PET reciclado**

Memoria para optar al título de ingeniero Civil

**Guillermo Alfredo Mella Hormazabal**

Profesora guía:

Carmen Muñoz Effa

Miembros de la comisión:

Juan Beltrán Morales

Carlos Gálvez Lillo

Santiago de Chile

2024

**Resumen de la Memoria  
para optar al título de:  
Ingeniero Civil  
Por:** Guillermo Alfredo Mella  
Hormazabal  
**Fecha:** 2024  
**Profesora Guía:** Carmen  
Muñoz Effa

## **Estudio de durabilidad de hormigones con agregado parcial de PET reciclado**

En el mundo la contaminación por desechos es un problema, y se busca por todos los medios avanzar hacia un mundo sustentable, de esta manera buscar nuevos métodos de reciclaje es fundamental para cumplir con los objetivos de la ONU hacia una sociedad sustentable.

El propósito de este estudio consiste en evaluar la viabilidad del empleo de PET reciclado, en adelante rPET, como reemplazo parcial de árido en el hormigón, focalizando la investigación en el aspecto de durabilidad del material y comparando los resultados obtenidos en estudios internacionales con las directrices establecidas por la norma chilena NCh170.

La metodología por utilizar consiste en compilar y analizar bibliografía internacional que abarquen ensayos de durabilidad en hormigones con rPET.

En un primer plano, en todos los casos estudiados, se observa una disminución en la resistencia y un aumento en la permeabilidad al aumentar la proporción de rPET en la mezcla. Este fenómeno plantea un desafío para la durabilidad del hormigón, especialmente dado que la normativa chilena rige la durabilidad a través de la permeabilidad, medida mediante el ensayo de penetración de agua.

La inclusión de mayores cantidades de rPET en la mezcla se traduce en un aumento de la permeabilidad, dificultando el cumplimiento de los requisitos normativos. Aunque varios estudios demuestran la conformidad con la norma en numerosos casos, especialmente para grados de exposición bajos.

La mayoría de los estudios sugieren que la reducción en la resistencia y el aumento en la permeabilidad derivan principalmente de la baja interacción entre la matriz de cemento y las partículas de rPET, generando porosidad que no se encontraría presente en un hormigón con áridos naturales. La solución propuesta para mitigar este problema es el alisamiento de la geometría de las partículas de rPET, mediante tratamientos químicos o térmicos. De los estudios analizados, se destaca que el tratamiento térmico muestra mejoras en la resistencia, extrapolándose la mejora a la permeabilidad debido a su relación directa con la porosidad.

## Tabla de contenido

1. Introducción .....	1
Motivación.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos .....	2
Metodología .....	2
2. Marco Teórico .....	3
Definiciones .....	3
Hormigón .....	3
Tereftalato de Polietileno (PET).....	6
Norma Chilena sobre durabilidad del hormigón .....	10
Agentes internos.....	10
Agentes externos.....	12
Reciclaje de PET en Chile .....	16
Ley Rep. ....	16
Cifras del reciclaje de PET en Chile .....	18
Proceso de reciclaje de PET en Chile .....	19
PET reciclado.....	20
Métodos y definiciones para entender el reciclado de PET .....	20
Características y propiedades rPET vs PET .....	22
Uso de rPET en la construcción.....	23
Aislantes .....	23
3. Estudios de otras características del hormigón con rPET.....	27
F. Carreño (2020).....	27
Saika & de Brito (2014).....	32
Qaidi et al (2024) .....	35
4. Estudios de Hormigones con rPET sobre durabilidad.....	40
Estudios .....	40
R. Saxena et al (2018).....	40

Lee, Zoe et al (2019).....	44
Sau et al. (2023) .....	47
Silva, de Brito & Saika (2013) .....	53
5. Memoria de calculo .....	57
6. Discusión y Análisis de estudios .....	59
Agentes internos .....	59
Contenido total de sulfatos .....	59
Contenido total de cloruros .....	59
Reacción árido-álcali.....	60
Agentes externos .....	61
Análisis preliminares .....	61
Ciclos hielo y deshielo .....	62
Ataque externo de sulfatos .....	62
Ataque externo de agentes que provocan corrosión .....	65
Hormigones de baja permeabilidad .....	66
Otros análisis .....	68
Tamaño rPET .....	68
Microestructura .....	69
Relación agua cemento .....	70
7. Conclusiones .....	72
8. Posibles investigaciones a futuro .....	74
9. Bibliografía .....	75

## Índice de Tablas

Tabla 1: Categorización por viscosidad y finalidad (JI, 2013).....	8
Tabla 2: Características físicas .....	9
Tabla 3: Características Químicas .....	9
Tabla 4: Contenido máximo de iones cloruro solubles en el hormigón (Instituto nacional de normalización, 2016).....	10
Tabla 5: Requisitos del hormigón sometido a la acción de congelación y deshielo (Instituto nacional de normalización, 2016) .....	12
Tabla 6: grados de exposición sulfatos (Instituto nacional de normalización, 2016) .....	13

Tabla 7: Requisitos del cemento para hormigón en contacto con sulfatos (Instituto nacional de normalización, 2016).....	13
Tabla 8: Requisitos del hormigón en contacto con sulfatos (Instituto nacional de normalización, 2016).....	14
Tabla 9: Clasificación de exposición que provocan corrosión (Instituto nacional de normalización, 2016).....	14
Tabla 10: Requisitos Hormigón expuestos corrosión .....	15
Tabla 11: Clasificación de hormigones de baja permeabilidad (Instituto nacional de normalización, 2016).....	15
Tabla 12: Metas domiciliarias de plásticos en la ley REP (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.) .....	17
Tabla 13: Metas no domiciliarias de plásticos en la ley REP (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.) .....	17
Tabla 14: Resumen de gestión de PET por año 2016-2021 (ANIR, 2021).....	18
Tabla 15: Distribución recomendada de arena (Carreño, 2020).....	30
Tabla 16: Distribución granulométrica recomendada grava natural (Carreño, 2020) .....	30
Tabla 17: Distribución granulométrica rPET .....	31
Tabla 18: Porcentaje de distribución de áridos zona 1(NCh163) recomendada (Carreño, 2020).....	31
Tabla 19: Porcentaje de distribución de áridos zona 2(NCh163) recomendada (Carreño, 2020).....	31
Tabla 20: Propiedades áridos y rPET (Saikia & de Brito, 2014) .....	33
Tabla 21: Mezcla de Hormigon Probetas (Saikia & de Brito, 2014).....	33
Tabla 22: Requisitos físicos y mecánicos del cemento según norma iraní (Qaidi, y otros, 2023) .....	35
Tabla 23: Propiedades rPET (Qaidi, y otros, 2023).....	36
Tabla 24: Distribución de mezclas (Qaidi, y otros, 2023) .....	38
Tabla 25: Propiedades cemento (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020) .....	41
Tabla 26: Mezclas de hormigón (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020) .....	42
Tabla 27: Mezclas de Hormigón (Lee, Paul, Kong, Susilawati, & Yang, 2019) .....	45
Tabla 28: Porcentaje de incremento de resistencias respecto a muestra control (Lee, Paul, Kong, Susilawati, & Yang, 2019).....	46
Tabla 29: Resultados ensayo penetración de agua (Lee, Paul, Kong, Susilawati, & Yang, 2019).....	46
Tabla 30: Propiedades áridos (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023) .....	47
Tabla 31: Propiedades cemento (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023) .....	48
Tabla 32: Propiedades áridos plásticos (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023) .....	49
Tabla 33: Detalle Mezclas Probetas (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023).....	50

Tabla 34: Penetración de agua (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023) .....	51
Tabla 35: Mezclas de probetas (Silva, de Brito, & Saikia, 2013) .....	54
Tabla 36: Migración de cloruros ambiente exterior- .....	55
Tabla 37: Migración de cloruros laboratorio .....	56
Tabla 38: Migración de cloruros cámara húmeda .....	56
Tabla 39: Penetración de agua total (Lee, Paul, Kong, Susilawati, & Yang, 2019) .....	57
Tabla 40: Calculo de penetración de agua .....	58
Tabla 41: Resumen de contaminantes en el reciclaje del PET .....	60
Tabla 42: Resumen comparación de agentes internos .....	61
Tabla 43: Comparación resultado de estudios vs exigencia de la norma para ataque externo de sulfatos .....	64
Tabla 44: Comparacion resultados estudios vs norma NCh170 ataque externo de agentes que provocan corrosión .....	66
Tabla 45: Comparación estudios de penetración de agua vs exigencias de la norma NCh170 hormigones de baja permeabilidad .....	67
Tabla 46: Resumen resistencia a compresión Saika y de Brito (MPa) .....	68
Tabla 47: Resumen resistencia a la compresión Saxena .....	69
Tabla 48: Resumen de resistencia a la compresión (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023) .....	70
Tabla 49: Resumen porosidad (Qaidi, y otros, 2023) .....	71
Ilustración 1: Línea de tiempo de la historia del hormigón .....	4
Ilustración 2: Primera etapa tecnología convencional de fusión (JI, 2013) .....	7
Ilustración 3: Segunda etapa tecnología convencional de fusión (JI, 2013) .....	7
Ilustración 4: Diseño PET(b)rick (Nováková, Šeps, & Achten, 2017) .....	25
Ilustración 5: Diagrama esquemático de la máquina de ensayo (Rathnayaka, De Silva, & De Silva, 2016) .....	26
Ilustración 6: Porcentaje de muestras que cumplen con los criterios estipulados para resistencia a la compresión a 28 días. (Carreño, 2020). .....	28
Ilustración 7: Relación entre cantidad de muestras totales y aquellas que cumplen con una resistencia superior al 90% del hormigón patrón, según su relación agua-cemento (Carreño, 2020). .....	29
Ilustración 8: Relación entre cantidad de muestras totales y aquellas que cumplen con una resistencia superior al 90% del hormigón patrón, según la cantidad de cemento (Carreño, 2020). .....	29
Ilustración 9: Resistencia a la compresión en 28 días (Saikia & de Brito, 2014). ..	34
Ilustración 10: Método de reciclaje utilizado (Qaidi, et al., 2023) .....	37
Ilustración 11: Distribución granulométrica (Qaidi, et al., 2023) .....	38
Ilustración 12: Porosidad vs %rPET (Qaidi, et al., 2023) .....	39

Ilustración 13: Distribución granulométrica arena (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020).....	40
Ilustración 14: Distribución granulométrica grava (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020).....	41
Ilustración 15: Gráfico resistencia a la compresión vs rPET % (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020). ....	42
Ilustración 16: Gráfico penetración de agua vs rPET% (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020).....	43
Ilustración 17: Distribución granulométrica ensayos (Lee, Paul, Kong, Susilawati, & Yang, 2019).....	45
Ilustración 18: Resultados ensayos resistencia a la compresión (Lee, Paul, Kong, Susilawati, & Yang, 2019). ....	46
Ilustración 19: Proceso de reciclaje PET y PE (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023). ....	48
Ilustración 20: Granulometría árido natural y reciclado (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023). ....	49
Ilustración 21: Resistencia a la compresión (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023). ....	50
Ilustración 22: Resistencia residual (%) probetas guardadas en solución alcalina (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023).....	52
Ilustración 23: Resistencia residual (%) probetas guardadas en agua marina (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023) .....	52
Ilustración 24: Resistencia residual de probetas guardadas en $H_2SO_4$ .....	52
Ilustración 25: Penetración de ion-cloruro (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023).....	53
Ilustración 26: Profundidad de carbonatación en ambiente exterior.....	54
Ilustración 27: Profundidad de carbonatación en laboratorio .....	55
Ilustración 28: Profundidad de carbonatación en cámara húmeda.....	55
Ilustración 29: Relación penetración de agua vs % rPET.....	68

## Introducción

### Motivación

Esta investigación encuentra su motivación en diversas consideraciones, respaldadas por una variedad de temas donde la inclusión de rPET como sustituto de árido en el hormigón estructural puede ofrecer soluciones. Entre las principales fuentes de inspiración destacan la crisis de áridos en el país, el compromiso con el desarrollo sostenible y sustentable establecido por la ONU, la creciente preocupación por la contaminación global causada por residuos plásticos, la centralidad del hormigón como material de construcción a nivel nacional y mundial, y la legislación ambiental de Responsabilidad Extendida del Productor (REP).

El hormigón, siendo el segundo material más utilizado después del agua, desempeña un papel esencial en la economía y el medio ambiente del país. En el año 2019, se produjeron más de 6 millones de metros cúbicos de hormigón en Chile, resaltando la magnitud de su impacto. La elevada demanda de materias primas para la producción de hormigón tiene consecuencias significativas, y uno de los problemas centrales que este estudio aborda es la sobreexplotación de áridos. La extracción excesiva de áridos contribuye a la erosión y desertificación del entorno, afectando negativamente las zonas de extracción. Por lo tanto, la posibilidad de reemplazar áridos tradicionales en el hormigón representa un valioso aporte para mitigar este impacto ambiental.

La investigación también incorpora los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la ONU, específicamente en tres áreas fundamentales: a) el Punto 9 sobre Industria, Innovación e Infraestructura; b) el Punto 11 relacionado con Ciudades y Comunidades Sostenibles; c) el Punto 12 que aborda Producción y Consumo Responsable. La inclusión de rPET en el hormigón contribuye a fomentar la innovación en la industria de la construcción, promover la sostenibilidad en el entorno urbano y avanzar hacia patrones de producción y consumo más responsables y circulares.

La legislación chilena de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), que promueve el reciclaje de PET, brinda una plataforma propicia para explorar y avanzar en el objetivo específico de este trabajo: la utilización de rPET como sustituto del árido tradicional en la construcción. Al alinearse con esta legislación, la investigación contribuye a la implementación práctica de medidas sostenibles en la industria de la construcción.

## Objetivo general

Evaluar factibilidad del uso de rPET en Chile como reemplazo parcial de áridos por medio de la revisión de estudios internacionales con respecto a la durabilidad del Hormigón.

## Objetivos específicos

- Definir agentes internos y externos que afectan la durabilidad del hormigón con rPET
- Comparar experiencias internacionales y nacionales respecto al comportamiento de los hormigones con rPET frente al ataque de agentes internos y externos que puedan afectar la durabilidad.
- Contrastar resultados de estudios con los requisitos de norma NCh170 vigente para propuesta de uso.

## Metodología

1. Levantamiento de información de agentes internos que afectan la durabilidad del hormigón
2. Levantamiento de información de agentes externos que afectan la durabilidad del hormigón
3. Levantamiento de estudios nacionales e internacionales de hormigón con rPET
4. Levantamiento de estudios nacionales e internacionales de hormigón con rPET donde se estudien temas de durabilidad (internos y externos).
5. Clasificar estudios nacionales e internacionales que serán utilizados.
6. Contrastar los resultados de los estudios con la norma chilena NCh170
7. Argumentar de acuerdo con esta información la validez del uso del hormigón con rPET en Chile.

## Marco Teórico

### Definiciones

#### Hormigón

El hormigón se define como una mezcla de cemento hidráulico, áridos y agua, con o sin aditivos, fibras u otros materiales cementantes (American Concrete Institute, 2018). Esta definición al principio simple puede ser ampliada por la definición de Neville y Brooks (2010). En el sentido más amplio, el hormigón es cualquier producto o masa elaborada mediante el uso de un medio de cementación. Por lo general, este medio es el producto de la reacción entre el cemento hidráulico y el agua. Sin embargo, en la actualidad, incluso una definición como ésta abarcaría una amplia gama de productos; El hormigón se fabrica con varios tipos de cemento y también podría contener: puzolana, ceniza volante, escoria de alto horno, micro sílice, aditivos, áridos de hormigón reciclado, aditivos, polímeros, fibras, etc. Estos hormigones pueden ser calentados, curados al vapor, autoclaves, tratados al vacío, sometidos a presión hidráulica, vibrados con impacto, extruidos y rociados (Neville & Brooks, 2010).

Para hablar de la historia del hormigón los expertos de [concretenetwork.com](http://concretenetwork.com) han desarrollado una línea del tiempo con los hitos más importantes, los cuales son los siguientes: Una de las formas más primitivas de hormigón se pueden definir en las mezclas de barro y paja utilizado por los egipcios para la construcción de sus pirámides cerca del 3000 A.C., estas contenían además yeso y limo para hacer mortero. Luego vendrían las construcciones romanas, de aquí la fórmula ya es bastante más parecida a la actual, con esto surgieron grandes estructuras que hasta el día de hoy siguen en pie como el coliseo y el panteón. También utilizaban productos animales como una forma primitiva de aditivos, esto entre el 300 A.C. y el 500 D.C. Ya llegando a la época moderna en el año 1824 Joseph Aspdin fue acreditado con la invención del cemento Portland, este nombre dado por una cantera que producía una roca extremadamente dura. En 1836, tuvo lugar la primera prueba de resistencia a la tracción y compresión en Alemania. La resistencia a la tracción se refiere a la capacidad del hormigón para resistir fuerzas de tensión o de separación. Avanzado el siglo XIX hay 2 hitos importantes, primero en 1889 se construye el primer puente de hormigón armado llamado Alvord Lake Bridge en San Francisco, CA, el puente sigue en pie en la actualidad. Poco después en 1891 se construyeron los primeros caminos de hormigón en Estados Unidos, más concretamente en Bellefontaine, Ohio. Y así continuaron innovando en distintos tipos de construcciones en hormigón, como el primer edificio en alto en 1903 y las primeras casas en 1908. De ahí en 1913 se hace la primera carga de camión mixer. Finalmente, en el siglo 20 con muchos avances en lo artístico para las terminaciones del hormigón y grandes avances en aditivos como en 1930 se formula el aditivo que

permitirá mayor entrada de aire al hormigón para una mayor resistencia a los ciclos de hielo y deshielo (Concrete Network, s.f.).

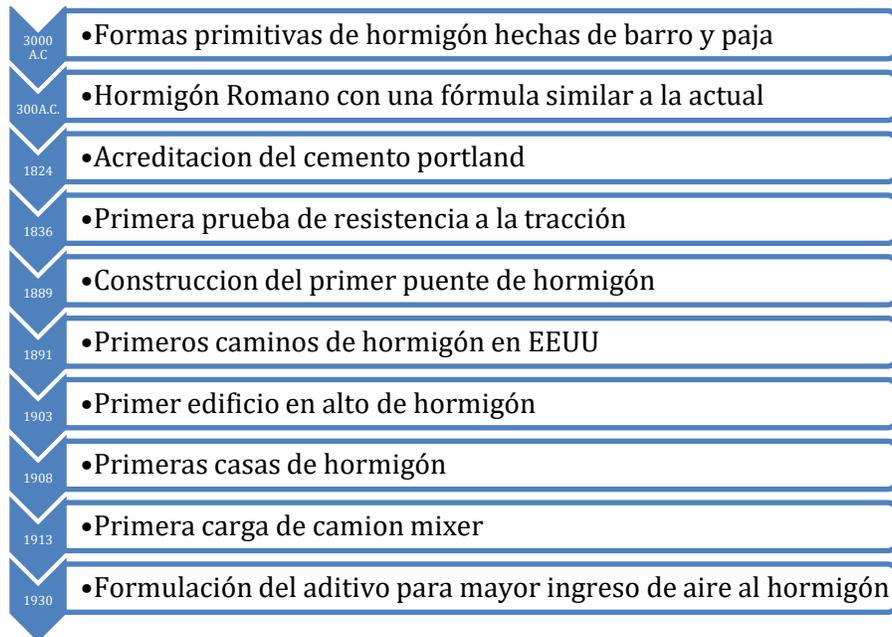


Ilustración 1: Línea de tiempo de la historia del hormigón

## Áridos

La definición dada por la norma chilena NCh163 es que los áridos son, material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estable. Si bien para la norma chilena esa definición es suficiente, se puede ampliar su definición diciendo que los áridos son: material granular, como arena, grava, piedra triturada, hormigón hidráulico triturado o escoria de alto horno de hierro, utilizado con un medio de cementación para producir hormigón o mortero (American Concrete Institute, 2018). Estos son categorizados en áridos finos y gruesos de acuerdo con el tamaño granular.

Los áridos finos son definidos como: “árido que pasa por el tamiz de apertura nominal de 5mm” (Instituto nacional de normalización, 1979). La ACI (American Concrete Institute) define de dos maneras distintas los áridos finos una muy parecida a la NCh163 primero del mismo tamiz de apertura nominal 4,75 mm hasta la de 75µm donde queda retenido casi en su totalidad, y por otro lado empezando en el tamiz anterior de 9,5mm y terminando donde mismo.

Los áridos gruesos de la misma forma son definidos como árido retenido predominantemente en el tamiz de 4,75 mm o esa porción retenida en el tamiz de

4,75 mm (American Concrete Institute, 2018). Definido de la misma manera en la norma chilena NCh163.

### **Cemento**

La ACI define el cemento como: “Cualquiera de una serie de materiales capaces de unir partículas de árido juntas”. Dentro de los tipos de cemento que define la ACI está el utilizado principalmente en construcción y el cual compete a este estudio, el cemento hidráulico el cual la ACI define como: “Un material aglutinante que fragua y endurece mediante reacción química con agua y es capaz de hacerlo bajo el agua”, por ejemplo, el cemento Portland y el cemento de escoria son cementos hidráulicos (American Concrete Institute, 2018). La definición de la norma chilena apunta de otra forma la descripción pasando de funcionalidad en la ACI a materialidad en la NCh148. es un material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire (Instituto Nacional de Normalización, 2021).

Finalmente, el cemento más utilizado en Chile es el cemento Portland el cual está definido por la NCh148 como producto que se obtiene de la molienda conjunta de Clinker Portland y sulfato de calcio y que puede aceptar hasta un 5% de componentes minoritarios (Instituto Nacional de Normalización, 1968). Con esto solo quedaría aclarar que la definición oficial en Chile de Clinker es el producto que está constituido principalmente, por silicatos cálcicos. Se obtiene por calentamiento hasta una temperatura que no podrá ser inferior a la temperatura de fusión incipiente de una mezcla homogénea finamente molida en proporciones adecuadas, formada principalmente por óxidos de calcio, silicio y por óxidos de aluminio y hierro en proporciones menores (Instituto Nacional de Normalización, 2021).

### **Agua**

El agua es utilizada tanto para la mezcla del hormigón como para su curado, dentro de la mezcla el agua se utiliza para hidratar el cemento y que de esta manera este sirva de aglomerante luego de secar. Para definir la cantidad de agua a utilizar en la mezcla se usa la proporción agua/cemento la cual entre otras características define la resistencia del hormigón. Aunque la porosidad del hormigón es un factor primario que influye en la resistencia y la durabilidad, es una propiedad difícil de medir en la práctica de ingeniería, o incluso de calcular, ya que el grado de hidratación no se determina fácilmente. De manera similar, la influencia de los áridos en la micro fisuración no se puede cuantificar de manera exacta. Por estas razones, los principales factores que influyen en la resistencia se toman en la práctica como la relación agua/cemento, el grado de compactación, la edad y la temperatura (Neville & Brooks, 2010).

Conociendo ya la importancia de la cantidad de agua que tenga la mezcla hay otras variables a considerar entre esas una de las más importantes es la calidad del agua la cual Neville & Brooks definen de la siguiente manera: “La calidad del agua es importante porque las impurezas en ella pueden interferir con: I) El fraguado del cemento; II) Afectar negativamente la resistencia del hormigón o causar manchas en su superficie; III) Provocar la corrosión del refuerzo. Por estas razones, la idoneidad del agua para fines de mezcla y curado debe ser considerada. Se debe hacer una clara distinción entre los efectos del agua de mezcla y el ataque al hormigón endurecido por aguas agresivas, ya que algunos de este último tipo pueden ser inofensivos e incluso beneficiosos cuando se utilizan en la mezcla (Neville & Brooks, 2010).

### Tereftalato de Polietileno (PET)

#### **Definición**

Tereftalato de Polietileno, comúnmente abreviado como PET, PETE o, de forma obsoleta, PETP o PET-P, es una resina de polímero termoplástico de la familia de los poliésteres. Las aplicaciones del tereftalato de polietileno (PET) se pueden dividir en tres categorías principales: I) fibra, II) botellas, III) uso industrial. Puede ser utilizado en: Fibras sintéticas, envases de bebidas, alimentos y otros líquidos, aplicaciones de termoformado, películas, plásticos y resinas de ingeniería, a menudo en combinación con fibra de vidrio. Las dos aplicaciones ampliamente utilizadas son los tejidos de PET y las botellas de PET (JI, 2013).

Los materiales primarios para fabricar PET son el glicol de mono etileno (MEG) y el ácido Tereftálico purificado (PTA) o el tereftalato de di metilo (DMT). Se requiere una alta pureza en todos los materiales primarios (JI, 2013).

Este material según dice Ji (2013) “puede encontrarse en dos formas: amorfa (transparente) y semicristalina (opaca y blanca), ambas como termoplásticos. Generalmente, exhibe una buena resistencia a los aceites minerales, disolventes y ácidos, aunque no a las bases”. El PET semicristalino se caracteriza por su resistencia, ductilidad, rigidez y dureza, mientras que el PET amorfo muestra una mayor ductilidad. Además, el PET posee una capacidad de procesamiento destacada y puede reciclarse para su uso en otras aplicaciones.

Para conocer las propiedades físicas y químicas del PET virgen Ji Li-Na (2013) brinda un breve repaso de las ventajas y desventajas asociadas a las propiedades del PET y a su vez define usos distintos del PET en función de sus propiedades.

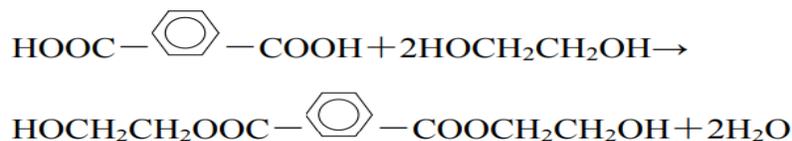
Como se explicó previamente, Ji Li-Na (2013) presenta dos métodos para producir PET. Una sería utilizar dimetiltriptamina (DMT) como materia prima o utilizar ácido tereftálico purificado (PTA), la gran diferencia entre usar ambos es el subproducto

que se genera después de pasar por el primer proceso, el cual se define como: Conventional melt technology (tecnología convencional de fusión).

La tecnología convencional de fusión implica varios pasos clave en su proceso, que incluyen:

- I) Preparación de materias primas,
- II) Esterificación/transesterificación,
- III) Prepolicondensación,
- IV) Policondensación.

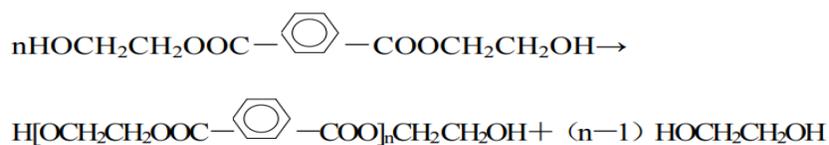
En el caso de utilizar DMT, se bombea el fundido de DMT y el catalizador junto con mono etilenglicol (MEG) hacia el sistema de transesterificación, donde la reacción ocurre a presión atmosférica mediante la separación del metanol, y los materiales resultantes se rectifican y recuperan. Por otro lado, cuando se parte de ácido tereftálico purificado (PTA), se mezcla el PTA con la solución de MEG y el catalizador en forma de pasta, y se introduce en el sistema de esterificación. En este caso, el primer paso en la secuencia de polimerización es una esterificación en lugar de una transesterificación, y esta esterificación tiene lugar bajo presión atmosférica al separar el agua del proceso (JI, 2013).



*Ilustración 2: Primera etapa tecnología convencional de fusión (JI, 2013).*

Ji destaca que el subproducto es agua y no metanol lo cual facilita el tratamiento de este. Después de los 60' del siglo pasado, la materia prima favorita pasará a ser PTA y no DMT.

Ya sea que se utilice PTA o DMT como material de partida, el segundo paso en la secuencia de polimerización, la policondensación de bishidroxietil tereftalato, es el mismo (JI, 2013):



*Ilustración 3: Segunda etapa tecnología convencional de fusión (JI, 2013).*

El producto resultante de la esterificación/transesterificación se dirige luego a la unidad de prepolicondensación, donde la reacción ocurre bajo vacío. El producto de prepolicondensación se alimenta al reactor final de policondensación, que opera a temperaturas elevadas y bajo vacío. La masa fundida de poliéster se procesa ya sea para producir fibras/filamentos o se envía a la unidad de policondensación en estado sólido (SSP) para fabricar gránulos de calidad para botellas. (JI, 2013)

Finalmente, el último paso solo para ciertos productos es el SSP, en el proceso de producción de SSP-según lo explicado por Ji -se divide en dos secciones en la planta. En la fase de fusión, se lleva a cabo una reacción para obtener un producto con una viscosidad intrínseca más baja, lo cual lo hace adecuado para aplicaciones textiles, pero no lo suficientemente apto para aplicaciones de alto peso molecular como las botellas. Ji menciona que este material con menor viscosidad intrínseca se somete a una polimerización adicional en la sección de policondensación en estado sólido para alcanzar la viscosidad intrínseca requerida para aplicaciones específicas, como el grado de botella.

Ya con el proceso de obtención de PET virgen se puede revisar las principales características que Ji menciona.

Lo más importante para caracterizar un producto PET de otro es su viscosidad intrínseca, esta varía de acuerdo con la aplicación que se requiere para el PET y Ji detalla tanto sus aplicaciones como el rango de viscosidad necesario para cada una de estas aplicaciones en la siguiente tabla:

*Tabla 1: Categorización por viscosidad y finalidad (JI, 2013)*

<b>Grado</b>	<b>Especie</b>	<b>Viscosidad (dl/g)</b>
Fibra	Textil	0,4-0,7
	Cuerda plástica	0,72-0,98
Película	BOPET	0,6-0,7
	Lamina térmica	0,7-1
Botella	Botella de agua	0,7-0,78
	Líquido carbonatado suave	0,78-0,85
Monofilamento, plástico ingenieril		1-2

Finalmente, para el presente trabajo, importan sus características físicas y químicas, las cuales de acuerdo con Ji se pueden encontrar las siguientes: Las características del PET (polietileno tereftalato) incluyen una alta dureza, rigidez y resistencia en estado termoplástico. Asimismo, presenta baja fricción y una notable resistencia a

la abrasión. Este material exhibe una elevada estabilidad dimensional y puede operar en un amplio rango de temperatura, desde -40°C hasta 100°C. En su estado semicristalino, el PET es de color blanco, mientras que en su estado amorfo se vuelve transparente, similar al vidrio. Además, destaca por su alta resistencia al seguimiento eléctrico, es fisiológicamente aceptable y muestra resistencia a agua a temperatura ambiente, ácidos diluidos, sales neutras y ácidas, alcohol, éteres, aceites, grasas, hidrocarburos aromáticos y alifáticos. Sin embargo, no es resistente a álcalis, vapor sobrecalentado, fenoles, ésteres, ácidos oxidantes e hidrocarburos clorados. Aunque el PET amorfo presenta una ligera reducción en dureza, rigidez y resistencia al calor en comparación con el PET cristalino, compensa con una mayor tenacidad.

Tabla 2: Características físicas

<i>Características</i>	<i>Valores</i>
<i>Dureza</i>	Alta
<i>Rigidez</i>	Alta
<i>Resistencia mecánica</i>	Alta
<i>Rango de operación</i>	-40°C, 100°C'
<i>Estados posibles</i>	Amorfo, Semicristalino

Tabla 3: Características Químicas

<b>CARACTERISTICAS QUIMICAS</b>	
<b>Resistente</b>	<b>Débil</b>
Agua, ácidos diluidos, sales neutras y acidas, alcoholes, éteres, aceites, grasas, hidrocarburos aromáticos y alifáticos.	Alcalis, vapor sobrecalentado, fenoles, ésteres, ácidos oxidantes e hidrocarburos clorados.

## Norma Chilena sobre durabilidad del hormigón

La durabilidad del hormigón se define como la capacidad del hormigón para resistir las condiciones químicas y físicas a las que estará expuesto durante su vida útil.

### Agentes internos

#### Contenido máximo de sulfatos

El contenido máximo de sulfatos en los componentes que no sean cemento, en otras palabras, el agua y los áridos, no deben presentar más de un 2% del peso del cemento que forma parte de la mezcla.

En la sección sobre el contenido máximo de sulfatos, la NCh170 establece que el contenido de sulfatos en los componentes que no sean cemento, es decir, agua y áridos, no debe exceder el 2% del peso del cemento en la mezcla. Comparando esto con las normas internacionales, la UNE 12620<sup>1</sup> establece un límite de sulfatos de hasta 0.2% del peso del árido, utilizando métodos similares para la determinación del contenido de sulfatos, aunque con un límite diferente. Por otro lado, la ASTM C33<sup>2</sup> especifica un límite de sulfatos del 0.1% en los agregados finos y gruesos, con métodos de medición parecidos, pero con un límite mucho más restrictivo.

#### Contenido máximo de iones cloruro

Como indica la NCh170 el contenido máximo de iones cloruro solubles en agua presentes en todos los componentes del hormigón vienen dados por la siguiente tabla.

Tabla 4: Contenido máximo de iones cloruro solubles en el hormigón (Instituto nacional de normalización, 2016)

Tipo de hormigón	Contenido de iones cloruro (Cl <sup>-</sup> ) solubles en agua ( $\frac{kg\ Cl^-}{m^3}$ )
Hormigón reforzado y hormigón en masa que contenga armado.	1,20
Hormigón Pretensado	0,25

NOTA: para cuantificar el contenido de iones cloruro se debe considerar el aporte de todos los componentes utilizados en  $1m^3$

En cuanto al contenido máximo de iones cloruro solubles en agua, la NCh170 presenta una tabla con los valores permitidos. La UNE EN 206<sup>3</sup> también establece límites similares para el contenido de cloruros en el hormigón, utilizando el método

<sup>1</sup> NE-EN 12620:2002+A1:2008 - Áridos para hormigón

<sup>2</sup> ASTM C33/C33M-18 - Standard Specification for Concrete Aggregates

<sup>3</sup> UNE-EN 206:2013+A1:2016 - Hormigón. Especificación, rendimiento, producción y conformidad

UNE 112011-97<sup>4</sup> para su medición. Los métodos de ensayo son distintos, aunque los límites establecidos son comparables. Por otro lado, la norma ASTM C1152<sup>5</sup> limita el contenido de cloruros a 0.15% para hormigón pretensado y 1% para otros tipos de hormigón, utilizando el método ASTM C1152 para determinar los cloruros solubles en agua. Aunque los métodos de ensayo son diferentes, los límites son similares.

### **Reacción árido-álcali**

Como dice en la NCh170 en caso de áridos definidos como reactivos por la norma NCh163 y además teniendo un hormigón expuesto a alta humedad o sumergido se debe cumplir una de las siguientes condiciones:

- a) Se dispone de información de estructuras previas con las mismas condiciones y fuente de áridos, las cuales no presentan daño por reacción árido-álcali.
- b) Se utilice cemento portland definido en la norma NCh148, cuyo contenido de álcalis solubles expresado en sodio sea menor o igual a 0,6%.
- c) Se verifique que la expansión determinada según ASTM C227, con los materiales de obra, sea menor a 0,05% a 3 meses o menor a 0,1 a 6 meses.
- d) Se cuente con estudios especiales que permitan su uso.

Para la reacción árido-álcali, la NCh170 hace referencia a los áridos definidos como reactivos y establece condiciones para su uso. La UNE EN 12620 aborda la reactividad álcali-árido utilizando el método de ensayo UNE 85215<sup>6</sup> para evaluar la expansión de los áridos reactivos. Los métodos son iguales, pero los periodos de evaluación pueden ser diferentes. Similarmente, la ASTM C33 también trata sobre la reactividad álcali-árido, utilizando el método ASTM C227<sup>7</sup> para evaluar la expansión de los áridos y estableciendo que no debe ser mayor a 0.05% a 3 meses. Aquí, los métodos de ensayo son iguales, aunque los criterios de aceptación pueden diferir.

---

<sup>4</sup> UNE 112011:2011 - Hormigones. Determinación del contenido de cloruros solubles en agua

<sup>5</sup> ASTM C1152/C1152M-04(2012) - Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete

<sup>6</sup> UNE 85215:1991 - Áridos. Ensayo de reactividad álcali-árido. Método rápido de laboratorio para áridos potencialmente reactivos

<sup>7</sup> ASTM C227 - Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)

## Agentes externos

### Congelación y deshielo

Para estos ciclos de acuerdo con la NCh170 el hormigón debe cumplir con los siguientes requisitos.

Tabla 5: Requisitos del hormigón sometido a la acción de congelación y deshielo (Instituto nacional de normalización, 2016)

Grado de exposición	Mínimo Grado de resistencia especificado MPa	Aire total %	Tamaño nominal del árido Dn mm
hormigón no expuesto a ciclos de hielo y deshielo	Sin restricción	Sin restricción	Sin restricción
hormigón expuesto a ciclos de hielo y deshielo y ocasionalmente expuesto a humedad	G30	6,0 5,0 4,5	10 20 40
hormigón expuesto a ciclos de hielo y deshielo y en contacto continuo con humedad	G30	7,5 6,0 5,5	10 20 40
hormigón expuesto a ciclo de hielo y deshielo y en contacto continuo con humedad y expuesto a productos químicos descongelantes	G35	7,5 6,0 5,5	10 20 40

De acuerdo con la NCh170 la tolerancia del % de aire es de  $\pm 1,5\%$ . Para hormigones superiores G35 el aire se puede reducir en un punto en comparación a la Tabla 5. La NCh170 permite valores distintos a los de la Tabla 5 mientras se demuestre que la expansión máxima obtenida no es mayor al 0,05% mediante ensayos de comportamiento del hormigón, de acuerdo con la NCh2185 en probetas de 28 días.

En la sección sobre ciclos de congelación y deshielo, la NCh170 establece requisitos específicos para el hormigón. La UNE EN 206 aborda estos temas utilizando el método de ensayo UNE 83316<sup>8</sup> para evaluar la resistencia a ciclos de congelación y deshielo. Los métodos de ensayo son distintos, aunque los parámetros evaluados son similares. En contraste, la ASTM C666<sup>9</sup> trata

<sup>8</sup> UNE 83316:1996 - Hormigón. Ensayos. Determinación de la resistencia a ciclos de hielo-deshielo

<sup>9</sup> ASTM C666 - Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing

específicamente sobre el hormigón sometido a estos ciclos, especificando un contenido de aire y resistencia mínima. Los métodos de ensayo son distintos, pero los objetivos de las pruebas son comparables.

### Ataque externo de sulfatos

Primero se debe categorizar el nivel de amenaza al que estará expuesto el hormigón. Esto se define con la siguiente tabla:

Tabla 6: grados de exposición sulfatos (Instituto nacional de normalización, 2016)

Grado	Contenido máximo $SO_4$	
	Soluble en suelo (%peso)	Disuelto en Agua (ppm)
S0 No Agresivo	<0,10	<150
S1 Moderada	$0,10 < SO_4 < 0,20$	$150 < SO_4 < 1500$
S2 Severa	$0,20 < SO_4 < 2,0$	$1500 < SO_4 < 10000$
S3 Muy severa	$2000 <$	$10000 <$

Ya conocido el nivel de amenaza se deben cumplir las exigencias tanto del hormigón como del cemento, para el cemento las exigencias son las siguientes:

Tabla 7: Requisitos del cemento para hormigón en contacto con sulfatos (Instituto nacional de normalización, 2016)

Grado	Requisitos del Cemento	
	Porcentaje de expansión según ASTM C1012 <sup>10</sup>	Contenido de $C_3A$ (%)
S0	Sin restricción	Sin restricción
S1	0,10 a 6 meses	$\leq 8$
S2	0,05 a 6 meses	$\leq 6$
S3	0,05 a 6 meses	$\leq 5$

El cemento utilizado debe cumplir con al menos uno de los dos requisitos indicados según el grado de exposición. En caso de que el cemento no cumpla con el requisito de expansión de 0,05% a 6 meses siempre se puede utilizar que la expansión no sea mayor a 0,10 a un año. Finalmente se presentan los requisitos del hormigón expuesto a sulfatos

<sup>10</sup> ASTM C1012 - Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution

Tabla 8: Requisitos del hormigón en contacto con sulfatos (Instituto nacional de normalización, 2016)

Grado de exposición	Mínimo grado de resistencia especificada	Dosis mínima de cemento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Profundidad de penetración de agua según Nch2262 (mm)
S0	G17	-	-
S1	G25	320	$\leq 40$
S2	G30	340	$\leq 30$
S3	G35	360	$\leq 20$

Respecto al ataque externo de sulfatos, la NCh170 categoriza el nivel de amenaza y establece requisitos para el cemento y el hormigón en contacto con sulfatos. La UNE 206 tiene límites similares y utiliza métodos de ensayo como UNE 104-400-94<sup>11</sup> para evaluar la resistencia a sulfatos. Aquí, los métodos de ensayo son parecidos y los criterios de aceptación son similares. La ASTM C1012 también especifica límites de expansión y contenido de C3A en cementos expuestos a sulfatos, con requisitos que varían según el grado de exposición. Los métodos de ensayo son parecidos y los criterios de aceptación son similares.

#### Ataque externo de agentes que provocan corrosión

Como en cada apartado es necesario primero categorizar por grado de exposición, para esto según la norma chilena la categorización es la siguiente:

Tabla 9: Clasificación de exposición que provocan corrosión (Instituto nacional de normalización, 2016)

Grado	Agente externo	Exposición en condiciones de servicio
C0	No agresivo	No aplica
C1	CO2	Hormigón seco o protegido contra la humedad
C2-A	Cloruro	Hormigón húmedo expuesto a altas concentraciones de CO2
C2-B	Cloruro	Hormigón sumergido completamente en agua que contiene cloruro
C2-C	Cloruro	Hormigón expuesto a aire salino
C2-C	Muy severo	Hormigón expuesto a ciclos de humedad y a una fuente externa de cloruro proveniente de productos descongelantes, sal, agua salubre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen.

<sup>11</sup> UNE 104-400-94 - Evaluación de la resistencia de los cementos a los sulfatos

Luego los requisitos para cada categoría.

Tabla 10: Requisitos Hormigón expuestos corrosión

Grado	Mínimo grado de resistencia especificada	Dosis mínima de cemento $\text{kg}/\text{m}^3$	Profundidad de penetración de agua según Nch2262
C0	G17	-	-
C1	G17	270	$\leq 50$
C2-A	G25	300	$\leq 40$
C2-B	G30	330	$\leq 30$
C2-C	G35	360	$\leq 20$

Para el ataque externo de agentes que provocan corrosión, la NCh170 clasifica por grado de exposición. La UNE EN 206 clasifica la exposición a agentes corrosivos y utiliza métodos de ensayo como UNE 83992-2<sup>12</sup> para evaluar la corrosión. Los métodos de ensayo son distintos, pero los objetivos de las pruebas son comparables. De manera similar, la norma ASTM C876<sup>13</sup> aborda la corrosión inducida por cloruros y otros agentes, utilizando métodos electroquímicos para medir el potencial de corrosión del acero embebido en el hormigón. Aunque los métodos de ensayo son diferentes, los objetivos de las pruebas son comparables.

#### Hormigones que necesiten baja permeabilidad

Tabla 11: Clasificación de hormigones de baja permeabilidad (Instituto nacional de normalización, 2016)

Grado	Condición	Profundidad de penetración de agua según Nch2262
P0	Hormigón en ambiente seco o en contacto con el agua pero que no requiere baja permeabilidad	-
P1	Hormigón en contacto con agua que requiere baja permeabilidad	$\leq 40$
P2	Hormigón en contacto con agua que requiere baja permeabilidad y existe posibilidad de ataque químico no considerado en las secciones anteriores	$\leq 20$

<sup>12</sup> UNE 83992-2 - Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Parte 2.

<sup>13</sup> ASTM C876 - Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete

Finalmente, en la sección sobre baja permeabilidad, la NCh170 define los requisitos para hormigones en contacto con agua a su vez la UNE EN 12390-8<sup>14</sup> especifica pruebas de absorción capilar para evaluar la permeabilidad del hormigón estos métodos de ensayo son distintos y los criterios pueden diferir. De manera similar, la ASTM C1202<sup>15</sup> utiliza el método de ensayo de permeabilidad rápida al cloruro (RCPT) para evaluar la penetración de cloruros. Aquí, los métodos de ensayo son distintos y los criterios también pueden diferir.

### Reciclaje de PET en Chile

Ley Rep.

La Ley 20.920 en Chile implementa la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), que obliga a los productores de “productos prioritarios” a encargarse de la gestión de los residuos generados por la comercialización de sus productos en el país. Bajo este régimen, los productores asumen la responsabilidad de la gestión de residuos de productos, como: neumáticos, envases, embalajes, aceites lubricantes, aparatos eléctricos, pilas, baterías, etc. Cumpliendo metas de recolección y valorización, a través de sistemas de gestión establecidos. Existe un régimen especial para la declaración de periódicos y revistas, que no están sujetos a estas metas (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.).

De acuerdo con el contexto de este estudio es de interés principalmente el apartado de envases y embalajes debido a que es de donde se obtiene el PET a reciclar. Esto aumentará el rPET en el país el cual permitirá otros usos de este material como el que se estudia en este documento.

Para llevar a la práctica lo antes dicho es importante aclarar las metas de esta ley. De acuerdo con la página oficial del ministerio de medio ambiente el apartado de Envases y embalajes entró en vigor el 16 de septiembre de 2023 y a partir de septiembre de 2022 se inició la revisión de los planes de gestión en proceso de conformación para este apartado, las metas de recolección estarán a cargo de los Grandes Sistemas de Gestión Domiciliarios (GRANSIC) y se presentan en tabla 11 y 12. (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.):

---

<sup>14</sup> UNE EN 12390-8 - Ensayos de hormigón endurecido. Profundidad de penetración de agua bajo presión

<sup>15</sup> ASTM C1202 - Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration

Tabla 12: Metas domiciliarias de plásticos en la ley REP (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.)

**Metas domiciliarias**

<b>Año</b>	<b>% Reciclaje de Plástico</b>
Primer año	3%
Segundo año	6%
Tercer año	8%
Cuarto año	11%
Quinto año	14%
sexto año	17%
Séptimo año	20%
Octavo año	23%
Noveno Año	27%
Décimo año	30%
Undécimo año	37%
A contar del duodécimo año	45%

Tabla 13: Metas no domiciliarias de plásticos en la ley REP (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.)

**Metas no domiciliarias**

<b>Año</b>	<b>% Reciclaje de Plástico</b>
<i>Primer año</i>	13%
<i>Segundo año</i>	19%
<i>Tercer año</i>	25%
<i>Cuarto año</i>	32%
<i>Quinto año</i>	38%
<i>sexto año</i>	42%
<i>Séptimo año</i>	46%
<i>Octavo año</i>	51%
<i>A contar del Noveno Año</i>	55%

### Cifras del reciclaje de PET en Chile

En la actualidad, el reciclaje de PET en Chile está experimentando un cambio significativo, gracias a la implementación de la Ley REP (Responsabilidad Extendida del Productor). Esta legislación ha propiciado medidas para generar un cumplimiento por parte de los productores en la gestión de los residuos generados por sus productos, incluyendo aquellos fabricados con PET. Conforme a los datos actuales de reciclaje de PET en Chile, se observa un incremento constante en los índices de recolección y valorización de estos residuos, reflejando así los esfuerzos de diversas entidades y del sector privado por cumplir con las metas establecidas por la ley.

En línea con los objetivos de “desarrollo sostenible” que define la ONU. Chile busca fortalecer aún más sus prácticas de reciclaje de PET, con el propósito de no solo cumplir con las metas nacionales de gestión de residuos, sino también contribuir activamente a la consecución de los Objetivos de “Desarrollo Sostenible” de las Naciones Unidas. Estos objetivos incluyen: la promoción de patrones de consumo y producción sostenibles (Objetivo 12), la acción climática (Objetivo 13), entre otros. Así, el país se enfoca en el fomento de una economía circular más robusta, que priorice: la reducción de residuos, la reutilización y el reciclaje. Alineándose con las directrices globales de sostenibilidad y preservación del medio ambiente.

Para argumentar estos dichos se presentan los datos en tabla 14 obtenidos entre los años 2016 y 2021 por la asociación nacional de la industria del reciclaje (ANIR) la cual en su informe del 2021 presentan los siguientes datos:

Tabla 14: Resumen de gestión de PET por año 2016-2021 (ANIR, 2021)

<b>Toneladas/año</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>
<i>Material disponible en el país</i>	79.845	85.227	84.023	87.532	92.535	114.101
<i>Material Gestionado en el país</i>	12.294	12.981	15.217	17.587	19.141	22.405
<i>Material no Gestionado en el país</i>	67.551	72.246	68.806	69.945	73.393	91.696
<i>Material gestionado por socios</i>	4.978	5.615	7.386	8.457	8.600	13.145
<i>Capacidad de trabajo</i>	20.585	20.585	30.667	35.267	35.267	39.147

Para explicar dichas cifras, se debe mencionar que el material disponible en el país se refiere al material disponible para reciclar y las otras son en función de este material. Otras cifras importantes es la cantidad posible para reciclar por la infraestructura del país, del mismo artículo se puede encontrar que en los años 2016 y 2017 se tenía una infraestructura para reciclar de 20.585 T, luego en 2018 ya se tenía la capacidad de 30.667 T En 2019 y 2020 ascendía a 35.267 T y finalmente, en 2021 39.147 T. Como se puede observar en estos datos, la capacidad está por sobre la utilización oscilando cerca del 55% de utilización durante estos años. En conclusión, se necesita mayor recolección del material lo cual viene siendo una consecuencia a futuro de la ley REP -cabe mencionar que la proyección a 3 años de la infraestructura es de 58.600 T (ANIR, 2021)

#### Proceso de reciclaje de PET en Chile

En el ámbito del reciclaje de PET en Chile, se encuentran diversas definiciones (aunque comparten similitudes). Para presentar el modelo chileno, se elige la definición del gobierno. Esta ofrece un marco integral, abordando etapas, requisitos y procesos.

El documento utilizado es realizado por Recipet S.A. y se encuentra en la página recicla Santiago del Ministerio de Medio ambiente. (Recipet, 2022)

Primero cabe mencionar las etapas que se utilizan, debido que el reciclaje en Chile es mecánico y no químico solo se encuentran 4 etapas claves: la fase previa que consiste en Prelavado y selección, una segunda etapa de molienda y prosigue un lavado para terminar con sorter.

I) Primera fase: Cada fardo de botellas se revisa mecánica o manualmente dependiendo de las instalaciones para encontrar como máximo una merma entre 6% y 12%, un 3% de otros colores, un 1% de otros plásticos y un 0,5% de desechos ferrosos o aluminio.

II) Segunda fase: Si bien no hay detalles en la página de gobierno sobre la molienda otras páginas como ANIR y ASIPLA mencionan el proceso de peletización, el cual consiste en moler el PET en pellets los cuales son pequeñas “cuñas” con una forma más parecida a una pastilla con superficie dentada.

III) Tercera fase: El lavado consiste en un baño de agua caliente donde se flota el plástico y luego se lava.

IV) Para finalmente clasificar el plástico en el proceso llamado sorter.

## PET reciclado

### Métodos y definiciones para entender el reciclado de PET

El reciclaje se destaca como una estrategia eficiente y económica para mitigar los desechos de PET. A pesar de la constancia en el precio del PET virgen, las tecnologías de reciclaje más asequibles ofrecen beneficios a la industria al facilitar el acceso a PET a un costo relativamente menor. En 1977, se llevó a cabo el primer intento global de reciclar botellas de PET posconsumo, marcando un hito en esta práctica. (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & ElMetwally, 2016)

Sin embargo, durante mucho tiempo, el reciclaje de botella a botella de materiales de envasado de PET posconsumo no fue posible debido a la falta de conocimiento sobre la contaminación de los polímeros de envase durante el primer uso o la recolección. Además, las eficiencias de descontaminación de los procesos de reciclaje eran en la mayoría de los casos desconocidas. Durante los últimos 20 años, la recolección de PET, así como los procesos de reciclaje, han avanzado enormemente. (Welle, 2011)

La presencia y naturaleza de contaminantes en las escamas de PET posconsumo surgen como factores críticos que influyen en la idoneidad del material para el reciclaje. La contaminación es la principal responsable del deterioro de las propiedades físicas y químicas del PET durante el reprocesamiento. Ácidos perjudiciales, como: el ácido acético de la degradación de cierres de poli(acetato de vinilo), ácido de resina y ácido clorhídrico originado por poli(cloruro de vinilo) (PVC). Actúan como catalizadores en las reacciones de escisión de cadenas durante el procesamiento fundido de PET posconsumo, con incluso pequeñas cantidades de PVC intensificando este efecto. (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & ElMetwally, 2016)

Por lo que informan Al-Sabagh Et. Al y Awaja & Pavel, entre los grandes contaminantes aparte de los ácidos se encuentra el agua, al reducir el peso molecular mediante la hidrólisis durante el reciclaje de PET posconsumo. Mantener la humedad por debajo del 0.02% es esencial para evitar la disminución del peso molecular, siendo la mayor parte de la humedad derivada del proceso de lavado de las escamas y pudiendo reducirse mediante un secado adecuado. Fragmentos de botellas coloreadas y etiquetas de tinta impresa, generan colores no deseados durante el procesamiento, aunque mejoras en los procesos de clasificación y lavado en el reciclaje de botellas pueden reducir este problema. El acetaldehído, subproducto de las reacciones de degradación del PET, está presente en el PET y el PET posconsumo, gestionado mediante la adición de estabilizadores como ácido 4-aminobenzoico, difenilamina y ácido 4,5-dihidroxibenzoico. El uso común de botellas de PET para almacenar sustancias como: Detergentes, combustibles y pesticidas puede introducir otros contaminantes que representan un riesgo para la

salud si quedan rastros después del reciclaje de PET posconsumo. (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & ElMetwally, 2016)

Existen cuatro perspectivas distintas para el reciclaje de materiales de PET, según lo señalado por Al-Sabagh de estas solo nos importa la primaria y secundaria debido a que en las otras se deja de lado por completo su naturaleza como PET.

- El reciclaje primario involucra el uso de desechos industriales preconsumo y material recuperado, donde los desechos limpios y no contaminados se mezclan con material virgen o se utilizan como material de segunda categoría para garantizar la calidad del producto.
- El reciclaje secundario, implica el reprocesamiento físico del PET posconsumo mediante molienda, fusión y reformación. Este proceso mecánico atraviesa diversas etapas, incluyendo la eliminación de contaminantes, el secado y el reprocesamiento por fusión. La eliminación de contaminantes es un paso crucial que abarca la clasificación, trituración y lavado de las botellas de PET posconsumo. Las escamas resultantes se lavan utilizando métodos como lavado con agua caliente y solución de NaOH, seguido de un lavado en frío con agua, o mediante lavado con solventes, utilizando tetracloretileno (TCE) para lavar las escamas de PET.
- El reciclaje terciario implica someter el PET de desecho a un tratamiento químico mediante el cual sus componentes son aislados y reprocesados para su uso en la fabricación.
- El reciclaje cuaternario, en el cual el contenido energético de los desechos plásticos puede ser recuperado mediante la incineración.

Todos los procesos de reciclaje convencionales de PET utilizan el lavado a base de agua del PET posconsumo para reducir la contaminación superficial y eliminar la suciedad, etiquetas y pegamento. Las botellas de PET posconsumo también se trituran en hojuelas en uno de los primeros pasos del proceso de reciclaje convencional. (Welle, 2011)

El secado es esencial en el reciclaje de PET posconsumo para minimizar el contenido de humedad y reducir el efecto de degradación hidrolítica. Finalmente, el reprocesamiento por fusión convierte las escamas de PET en gránulos mediante extrusión convencional a 280 °C. A pesar de sus ventajas en términos de simplicidad, bajos costos y bajo impacto ambiental, este método presenta desafíos como la reducción de viscosidad y la generación de oligómeros cíclicos y lineales que afectan las propiedades del producto final. La presencia de contaminantes como PVC, PVDC, pegamentos y otros puede catalizar la hidrólisis de los enlaces éster durante el reprocesamiento térmico, y el amarillamiento del polímero

representa un desafío al reciclar PET posconsumo para la producción de botellas. (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & ElMetwally, 2016)

Para terminar con los procesos de reciclaje es importante mencionar que uno de los reciclajes químicos usados es la hidrólisis álcali (Al-Sabagh, Yehia, Eshaq, Rabie, & ElMetwally, 2016), esto es importante para tener en cuenta debido a la reacción ácido-álcali de la norma NCh170.

#### Características y propiedades rPET vs PET

Celik et. Al desarrolló un estudio en el cual compara varias muestras de rPET las cuales vienen en 2 formatos, rPET regranulado comercial y rPET cuñas regranuladas, con bibliografía que posee de PET virgen (vPET).

De acuerdo con el estudio de Celik et. Al. La temperatura de fusión se mueve en un rango similar si comparamos rPET con vPET, cerca de los 240°C-250°C y la temperatura de cristalización también con el detalle que hay diferencias entre los dos tipos de rPET estudiados encontrando en los rPET regranulados comerciales una temperatura ligeramente superior (Celik, Shamsuyeva, & Endres, 2021). De esto se notó además que los PET con mayor temperatura de cristalización formaban cristales más perfectos y de mayor tamaño además de una temperatura mayor de fusión.

Las propiedades de un polímero, como la transparencia, densidad, ductilidad o resistencia, dependen en gran medida de la cristalinidad del polímero. El DSC es uno de los métodos principales utilizados para determinar la cristalinidad de una muestra. Los resultados observados para el rPET son comparables con los valores de la literatura de 29.7–32.9% para rPET. Aunque los valores para el rPET están en línea con los del vPET, en general están más cerca del valor mínimo de 25%. Las hojuelas regranuladas muestran un grado de cristalinidad ligeramente mayor que los regranulados comerciales, lo que posiblemente también sea un resultado del contenido de humedad residual. (Celik, Shamsuyeva, & Endres, 2021).

Si bien se espera que el rendimiento del rPET sea menor al vPET en promedio según el estudio de Celik et. Al no llega nunca a los mínimos de vPET por lo que se puede esperar un comportamiento similar de parte de este, la gran problemática que se presenta tanto en este estudio como en los estudios que hablaban de los métodos de reciclaje es la contaminación posconsumo y una limpieza en el reciclaje de mala calidad.

## Uso de rPET en la construcción

En esta sección se desglosarán diferentes aplicaciones del rPET en la construcción, estas aplicaciones se explicarán levemente presentando estudios acerca de cada aplicación. La finalidad es comprender que el rPET tiene otras aplicaciones en la construcción además del uso como árido, lo cual es el propósito de estudio de esta tesis.

### Aislantes

Dentro de las muchas aplicaciones encontradas se encuentra el uso del rPET como aislante acústico y térmico. Estos estudios presentan distintas formas de aplicar como aislante el rPET. Para este tema se presentan 2 estudios de diferente naturaleza Marques et al y Koh et al.

Marques et al presenta un estudio sobre planchas de aislamiento térmico y acústico hechas de rPET, esto se plantea desde el punto en el que para estos propósitos lo más utilizado en construcción es el poliuretano el cual presenta un gran problema debido a su inflamabilidad. (Marques, y otros, 2018)

Para solucionar esto presenta compuesto con 30%,50% y 55% de residuos de tereftalato de polietileno y trihidrato de alúmina, los cuales demostraron una mayor estabilidad térmica (analizada mediante termogravimetría) y baja inflamabilidad (evaluada a través de los ensayos UL-94 y calorímetro de cono), gracias a la presencia de estos componentes. (Marques, y otros, 2018)

Otros resultados que obtuvo fueron que El análisis microestructural reveló que todos los compuestos mostraban una reducción en el tamaño de los poros de la matriz de poliuretano sin afectar la capacidad de aislamiento térmico y acústico del material. Los resultados del estudio indicaron que la capacidad de aislamiento térmico se mantenía, mientras que la capacidad de aislamiento acústico mejoraba en comparación con las espumas de poliuretano tradicionales. (Marques, y otros, 2018)

Koh et al plantean el uso de rPET en mezclas para la generación de Aero gel con aplicaciones de aislamiento térmico y acústico. Estos se desarrollan a partir de fibras de rPET, entrecruzadores de alcohol polivinico (PVA) y glutaraldehído (GA) mediante liofilización. (Koh, et al., 2018)

Se llevó a cabo una investigación sobre los efectos de diversas concentraciones de fibras de rPET (0.5, 1.0 y 2.0% en peso), denieres de fibras (3D, 7D y 15D) y longitudes de fibras (32 mm y 64 mm) en las estructuras y propiedades de los aerogeles de rPET. Los aerogeles desarrollados presentaron una estructura de red altamente porosa (98.3-99.5%), densidades bajas (0.007-0.026 g/cm<sup>3</sup>), hidrofobicidad con ángulos de contacto con el agua de 120.7-149.8°, y alta elasticidad con un módulo de compresión de Young bajo (1.16-2.87 kPa). Mostraron

una capacidad de aislamiento térmico sobresaliente, con conductividades térmicas bajas de 0.035-0.038 W/mK, que son muy competitivas en comparación con los aerogeles de celulosa reciclada y de sílice-celulosa, y superiores a la lana mineral y el poliestireno. Además, los resultados de absorción acústica superaron a los de un absorbente de espuma acústica comercial en una amplia gama de frecuencias. (Koh, et al., 2018)

Uno de los usos más conocidos es el uso de eco ladrillos, los cuales son botellas de PET posconsumo que se rellenan con áridos y otros componentes para usarlos como ladrillos en pequeñas construcciones. Para este apartado los estudios son bastantes, aquí señalaremos algunos con una breve explicación sobre cada uno.

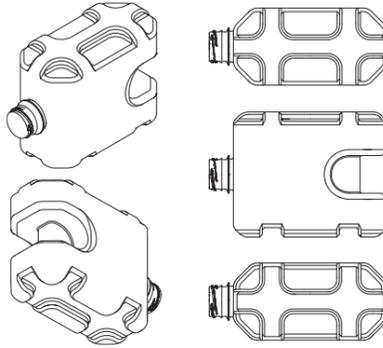
Primero tenemos a Sharma (2017) el cual plantea un estudio donde analiza térmicamente la estructura, estudia el aislamiento acústico, transmisión de luz además de los parámetros de fuerza y estabilidad estructural.

Los resultados que obtiene que en temas acústicos el aislamiento es peor que el ladrillo convencional y los bloques de cemento, la luz que pasa es imperceptible al ojo humano y en cuanto a la estabilidad estructural, un muro de 3m de alto y 30 de cm de grosor resiste cerca del 50% que resistirían los bloques, la posible explicación de esto es el mortero que se usa de unión. (Sharma, 2017)

El estudio de Nováková et al produce PET(b)rick con propiedades específicas que vienen dadas por las siguientes características: (a) producida con tecnología de moldeo por soplado; (b) buenas características de apilamiento para eliminar o minimizar el uso de material de unión entre las botellas de PET; y (c) producida a partir de rPET. Esta botella de PET especial resultó en una serie de ladrillos producidos y patentados llamados PET(b)rick 1.0. (Nováková, Šeps, & Achten, 2017)

Estos presentan una resistencia razonable a la tracción y una resistencia a la compresión dependiente de su relleno, además el margen de temperaturas en las que resiste el calor o el hielo es pequeño. (Nováková, Šeps, & Achten, 2017)

Por último, el estudio concluye que estos ladrillos no son adecuados para paredes autosostenidas, pero pueden funcionar como material de relleno fácilmente apilable dentro de una estructura portante. (Nováková, Šeps, & Achten, 2017)



*Ilustración 4: Diseño PET(b)rick (Nováková, Šeps, & Achten, 2017)*

El último uso del que hablaremos en esta sección es el rPET como material para tuberías, principalmente como tuberías hídricas. Sobre este tema se mencionarán dos estudios que tienen aplicaciones completamente diferentes para tuberías de agua.

El primer estudio es el de Aurea (2020) trata sobre la producción de tuberías de plástico reemplazando un porcentaje del material virgen por residuos plásticos sólidos, más exactamente rPET y polipropileno (PP), buscando lograr propiedades mecánicas que compitan con las que tienen las tuberías hechas de material virgen. (Aurea, y otros, 2020)

Para lograr esto se utilizaron formulaciones de PP/PET al 70/30% en peso y se analizó el impacto de reemplazar material virgen por los distintos plásticos reciclados en la microestructura, propiedades térmicas y mecánicas del material final. (Aurea, y otros, 2020)

Los resultados demostraron la viabilidad del uso de los plásticos reciclados en las tuberías, es importante destacar que el rPET mejoró las propiedades de flexión en comparación a cuando se usaba rPP sin comprometer las propiedades de impacto. Como último resultado clave la utilización de compatibilizante comercial para poder unir rPET y rPP presentó mejoras en las propiedades de las tuberías con ambos materiales. (Aurea, y otros, 2020)

Por último, el estudio de Rathnayaka (2016) nos muestra la utilización de rPET en tuberías de hormigón, a modo de fibras de reforzamiento para reemplazar el reforzamiento de acero que requiere maquinaria compleja para llevarse a cabo.

Para esto se moldearon cubos con 0%, 1%, 2% y 3% de fibra con relación agua cemento de 0,3 y 0,45. Se ensayaron 3 tipos de hormigón (simple, reforzado clásico y con fibras de rPET) en la prueba de soportes de 3 bordes obteniendo una resistencia a la compresión óptima de 45,8 MPa con la mezcla de 2% que contiene

2% de fibra con una relación A/C de 0,3. Los ensayos en general entregaron resultados que favorecen el utilizar fibra de rPET como reemplazo económico del reforzamiento de acero utilizado convencionalmente. (Rathnayaka, De Silva, & De Silva, 2016)

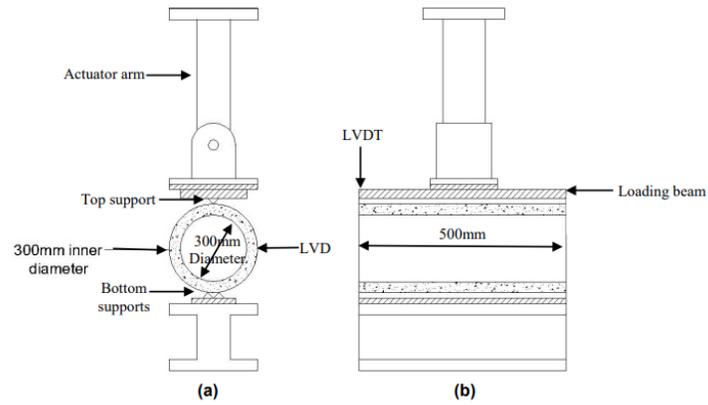


Ilustración 5: Diagrama esquemático de la máquina de ensayo (Rathnayaka, De Silva, & De Silva, 2016)

## Estudios de otras características del hormigón con rPET

Si bien en el enfoque de este estudio es durabilidad, es importante analizar cómo el rPET usado como reemplazo parcial de áridos afecta otras características del hormigón para poder hacer un análisis más exacto entendiendo causa y consecuencias de las diferencias entre un hormigón convencional y el hormigón con rPET, por eso en este apartado se analizan propiedades como la resistencia y la porosidad.

### F. Carreño (2020)

Este estudio es un análisis de estudios internacionales de resistencia de hormigón con reemplazo parcial de áridos por rPET comparándolos con la normativa ACI y luego su haciendo un análisis económico de la viabilidad de usar este método de reemplazo de áridos.

Carreño consideró 11 estudios de reemplazo parcial de áridos por rPET, y 2 en los cuales se utilizaba el rPET como reforzamiento (fibra). En este estudio sobre la resistencia del hormigón, se exploraron los estándares definidos por la normativa ACI318-11 para evaluar la viabilidad del hormigón. Se destacaron dos criterios esenciales:

La necesidad de que el promedio de tres ensayos consecutivos sea igual o mayor a  $f_c'$ .

La restricción de que ningún resultado individual de ensayo sea inferior a  $f_c'$  por más de 3,5 MPa (si la resistencia es  $\leq 35$  MPa) o por más de 0,1  $f_c'$  (si  $f_c'$  es  $> 35$  MPa). Esta perspectiva detallada se adoptó debido a la variabilidad de los resultados y condiciones, garantizando un análisis exhaustivo de la resistencia del hormigón. Finalmente entrega una dosificación recomendada usando rPET como reemplazo parcial de árido en el hormigón de acuerdo con la ACI211.1-91.

Carreño plantea que, en el caso de no haber una formulación específica para la resistencia del hormigón (caso II) en los estudios analizados por ella, se puede asumir que la resistencia base ( $f_c'$ ) corresponde a la obtenida en cada mezcla sin agregado rPET. Para simplificar el análisis del Criterio de aceptabilidad (II), se propone que ninguna muestra debiese tener una resistencia inferior al 90% de la resistencia sin agregado plástico. Así Carreño plantea 3 criterios: diferencia de resistencia inferior al 10%, 5% y 2,5% entre la mezcla patrón y la mezcla con agregado rPET, con el fin de identificar de manera más sencilla las muestras que cumplen con este criterio en el estudio de la resistencia del hormigón. Esto se aplicó a las resistencias a compresión, flexión y tracción. En este caso, solo se revisará la tracción. De aquí Carreño, entrega el siguiente gráfico.

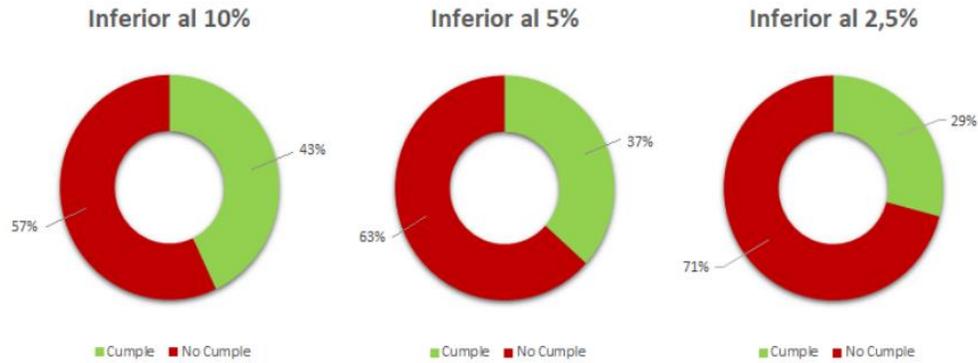


Ilustración 6: Porcentaje de muestras que cumplen con los criterios estipulados para resistencia a la compresión a 28 días. (Carreño, 2020).

En el análisis detallado realizado por Carreño, se observa que los hormigones que cumplen con la condición de tener una diferencia de resistencia igual o inferior al 10% entre aquellos con y sin agregado rPET muestran una relación directa entre la resistencia lograda y la cantidad de cemento, así como la relación agua-cemento. Se destaca que un aumento en esta relación conlleva a una reducción en la resistencia debido a la presencia de poros, mientras que una disminución en la cantidad de cemento también influye en la disminución de la resistencia.

Se resalta también la importancia del tipo de rPET empleado en la mezcla, señalando que el rPET tratado térmicamente y conformado en forma cilíndrica tiende a ofrecer mejores resultados en pruebas de compresión y una mayor trabajabilidad en comparación con el rPET triturado de manera gruesa e irregular, el cual requiere ajustes en la relación agua-cemento y la incorporación de plastificantes. No obstante, se menciona que incluso el rPET triturado con granulometría entre 1 mm y 5 mm puede lograr una resistencia adecuada.

En cuanto a la calidad y cantidad de cemento, se destaca que las muestras con una resistencia superior al 90% suelen estar compuestas por más de 350 Kg de cemento por metro cuadrado, evidenciando que el uso de cementos de alta resistencia o la adición de materiales como caliza, escoria de alto horno o puzolana contribuyen a obtener resultados favorables en la resistencia del hormigón.

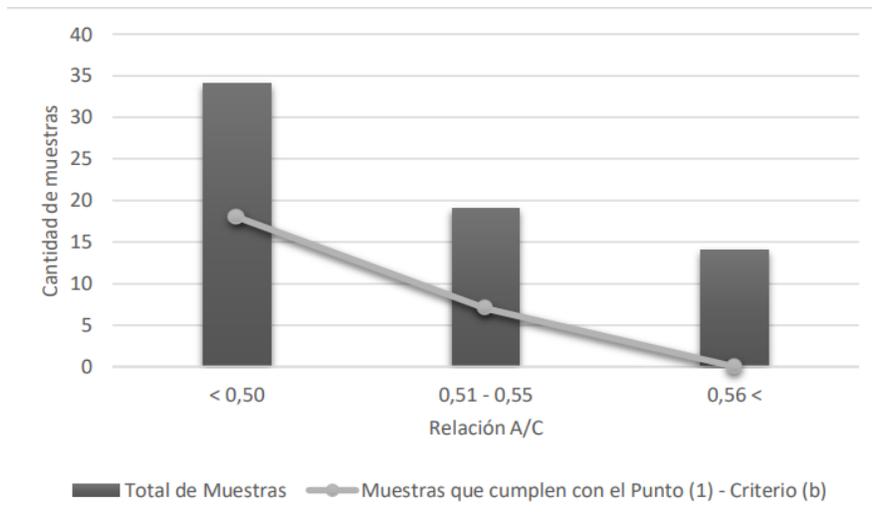


Ilustración 7: Relación entre cantidad de muestras totales y aquellas que cumplen con una resistencia superior al 90% del hormigón patrón, según su relación agua-cemento (Carreño, 2020).

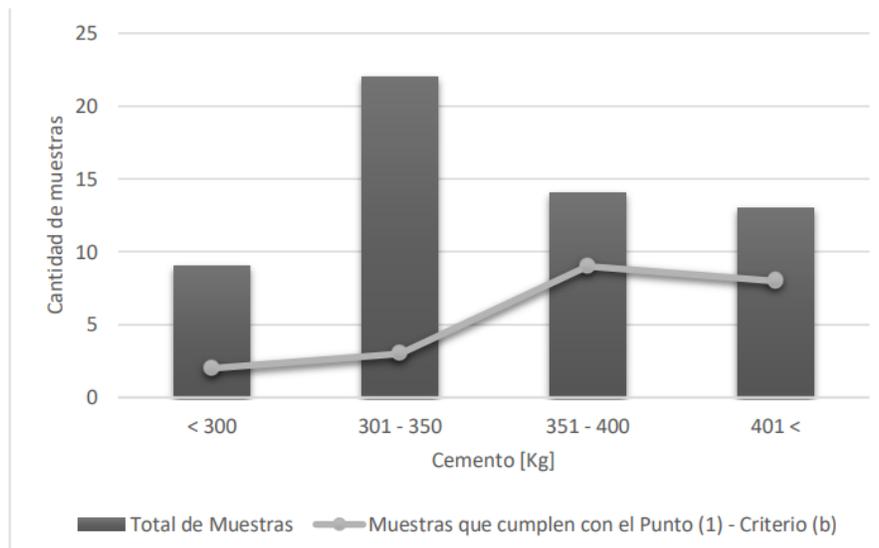


Ilustración 8: Relación entre cantidad de muestras totales y aquellas que cumplen con una resistencia superior al 90% del hormigón patrón, según la cantidad de cemento (Carreño, 2020).

De aquí Carreño plantea una dosificación para hormigones con reemplazo del 5% y 10% del árido fino por rPET siguiendo una metodología autoimpuesta.

Carreño estableció el uso de hormigón de grado 25 a la compresión, prescindiendo de datos estadísticos y consideraciones especiales como ambientes de hielo-deshielo, exposición a sulfatos u otros factores que puedan provocar corrosión. Dado que los estudios disponibles no presentan mezclas con grava, Carreño sugirió un tamaño máximo de 19 mm para el agregado grueso, limitándose a gravilla.

La determinación de la granulometría, densidad relativa y absorción de los áridos sigue las indicaciones de Carreño, utilizando el promedio de tres estudios en canteras de la región metropolitana y los datos obtenidos por Rojas (2012).

Para esto la autora plantea una distribución granulométrica para cada tipo de agregado, considerándose para esto 3: la grava, la arena y el rPET triturado sin ningún tratamiento. Estas distribuciones son presentadas en las tablas a continuación.

Tabla 15: Distribución recomendada de arena (Carreño, 2020)

Tamices		% Pasa Acum.
ASTM	[mm]	
3/8"	9,53	100
#4	4,75	88
#8	2,36	68
#16	1,18	54
#30	0,6	38
#50	0,3	18
#100	0,15	7
Absorción de agua (%)	1,347	
Densidad relativa (kg/m <sup>3</sup> )	2,673	

Tabla 16: Distribución granulométrica recomendada grava natural (Carreño, 2020)

Tamices		% Pasa Acum.
ASTM	[mm]	
2"	50,8	100
1,5"	38,1	100
1"	25,4	100
3/4"	19,05	97
1/2"	12,7	48
3/8"	9,53	16
#4	4,75	1
#8	2,36	0
#16	1,18	0
#30	0,6	0
#50	0,3	0
#100	0,15	0
Absorción de agua (%)		0,97
Densidad relativa (kg/m <sup>3</sup> )		2,702

Tabla 17: Distribución granulométrica rPET

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

Ya con esto realizado procede a utilizar la distribución de árido combinado por zona según la norma NCh163 con esto se caracterizan 2 zonas de acuerdo con las tablas a continuación.

Tabla 18: Porcentaje de distribución de áridos zona 1(NCh163) recomendada (Carreño, 2020)

% de Reemplazo	Árido combinado %		
	Arena	rPET	Gravilla
0%	0,36	-	0,64
5%	0,34	0,02	0,64
10%	0,32	0,04	0,64

Tabla 19: Porcentaje de distribución de áridos zona 2(NCh163) recomendada (Carreño, 2020)

% de Reemplazo	Árido combinado %		
	Arena	rPET	Gravilla
0%	0,47	-	0,53
5%	0,45	0,02	0,53
10%	0,42	0,05	0,53

Al revisar las investigaciones de Carreño sobre la integración de rPET en la construcción, se destaca la posibilidad de elaborar hormigones con resistencias equivalentes a las convencionales, siempre y cuando el reemplazo de áridos finos por rPET no supere el 20%. Carreño sugiere que el rPET puede caracterizarse como árido, aunque recomienda el uso de normativas europeas para clasificar propiedades clave como granulometría, densidad aparente y resistencia mecánica.

Las conclusiones indican que es factible sustituir entre el 0,5% y el 20% de rPET en la mezcla, siendo la cantidad de cemento, la relación agua/cemento y el tipo de rPET aspectos.

En términos de flexión, Carreño observa resultados superiores a los de compresión, con una diferencia promedio de 0,1 MPa en comparación con el hormigón convencional. La disminución del módulo de elasticidad hasta un 70% y la variabilidad en la absorción de agua resaltan la importancia de la homogenización del rPET. Además, se señala una mejora en la resistencia a la abrasión, aunque cuantificar este aspecto resulta desafiante debido a métodos de medición diversos.

Carreño propone un reemplazo óptimo del 10% de rPET por árido fino, considerando que este esté simplemente triturado. En cuanto a costos, se destaca un aumento del 5% y 10% al sustituir entre el 5% y el 10% de los agregados naturales por rPET, respectivamente. La posibilidad de compensar estos costos mediante políticas públicas y colaboraciones con pymes dedicadas al reciclaje de rPET se plantea como un aspecto clave.

Saika & de Brito (2014)

Este estudio tiene como objetivo investigar cómo tres variables específicas inciden en la resistencia del hormigón cuando se realiza un reemplazo parcial de árido por rPET. Estas variables incluyen el tamaño nominal del rPET, la geometría de este material y el porcentaje de reemplazo de rPET. La experimentación contempla tres niveles diferentes de reemplazo: 5%, 10% y 15%, junto con un grupo de referencia que no contiene reemplazo (0%).

Para llevar a cabo esta evaluación, se emplean dos tipos distintos de geometrías en el rPET. Uno de ellos es el estándar, el cual se obtiene mediante un proceso de trituración que le otorga una forma dentada característica. El segundo tipo se trata específicamente con calor para lograr una geometría más lisa en su superficie y forma.

Los fragmentos de rPET se presentan en dos tamaños diferenciados: uno se utiliza como material grueso, mientras que el otro se emplea como material fino. El rPET tratado con calor se define principalmente por su tamaño nominal, considerándose como material fino.

Tabla 20: Propiedades áridos y rPET (Saikia & de Brito, 2014)

Propiedad	Árido grueso Natural	Árido fino natural	rPET dentado grueso	rPET dentado fino	rPET con tratamiento
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2.670	2.612	1.340	1.340	1.360
Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	2.627	2.601	1.330	1.320	1.360
Gravedad específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2.606	2.643	1.350	1.350	1.360
Absorción de agua (%seco, 24hrs)	0,63	0,2	0,18	0,25	0,1

Luego de las propiedades de los áridos es importante conocer cómo se formuló la mezcla de hormigón utilizada para las distintas probetas, cabe destacar que se le asignó la letra C a las con rPET grueso, la letra F a las con rPET fino dentado y la letra P a las con rPET fino con tratamiento de calor. Al final se le agrega el número representativo del % de reemplazo de árido por rPET

Tabla 21: Mezcla de Hormigon Probetas (Saikia & de Brito, 2014)

Mezclas de Hormigón	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Grueso (kg/m <sup>3</sup> )	Fino (kg/m <sup>3</sup> )	PC (kg/m <sup>3</sup> )	PF (kg/m <sup>3</sup> )	PP (kg/m <sup>3</sup> )
Ref.	350	185,5	996,4	802,7	-	-	-
PC5	350	213,5	920,4	788,4	45,9	-	-
PC10	350	227,5	844,5	774,1	91,7	-	-
PC15	350	259	768,5	759,8	137,5	-	-
PF5	350	199,5	996,4	713,3	-	45,9	-
PF10	350	210	996,4	624	-	91,7	-
PF15	350	224	996,4	534,6	-	137,5	-
PP5	350	185,5	996,4	713,3	-	-	45,9
PP10	350	182	996,4	624	-	-	91,7
PP15	350	182	996,4	534,6	-	-	137,5

En este caso si bien no se realizaron ensayos de permeabilidad si se utilizaran los datos de resistencia a la compresión.

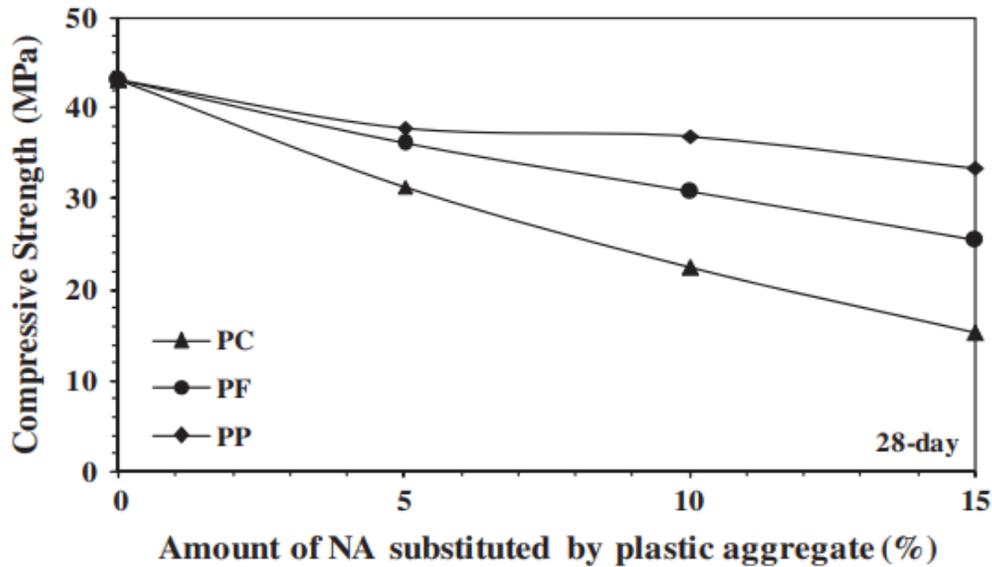


Ilustración 9: Resistencia a la compresión en 28 días (Saikia & de Brito, 2014).

En el trabajo realizado por Saikia y De Brito, se presentan diversas conclusiones derivadas de la evaluación de propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón con incorporación de áridos plásticos reciclados (rPET). Las observaciones que surgen de su investigación son las siguientes:

Se destaca que las propiedades del hormigón, tanto en su estado fresco como endurecido, están vinculadas al tamaño y la forma del árido de rPET utilizado. Se observa que el árido rPET casi esférico y de superficie lisa (PP) reduce la relación agua/cemento, aumentando así el valor de asentamiento de la mezcla de hormigón. En contraste, áridos rPET angulares y no uniformes (PF y PC) incrementa el requerimiento de agua y reducen el valor de asentamiento, siendo esta tendencia influenciada por la distribución del tamaño de partícula de los áridos de rPET.

Una reducción en la densidad del hormigón fresco se registra a medida que se incrementa el contenido de árido plástico, atribuyendo esto a la baja densidad de partículas del árido plástico en comparación con el árido natural.

Las resistencias mecánicas (compresiva, de tracción, por flexión y de tracción por separación) y el módulo de elasticidad del hormigón que incorpora árido rPET, resultan ser inferiores en comparación con el hormigón de referencia. Este decremento en las propiedades mecánicas es más pronunciado al aumentar el contenido de árido rPET, y la relación de reducción sigue la secuencia PP > PF > PC a niveles de sustitución dados.

Las diferencias en tamaño, forma y textura de los áridos rPET afectan la relación agua/cemento y el asentamiento en las mezclas de hormigón fresco, teniendo un impacto directo en el comportamiento mecánico del material.

En términos de resistencia a la tracción, se observa que las partículas alargadas y escamosas de los áridos rPET gruesos y finos actúan como puentes entre las dos piezas de hormigón después de la falla, evitando la separación total. En contraste, las muestras de hormigón con árido casi esférico y árido natural se dividen en dos piezas después de la falla.

Se destaca que la resistencia a la abrasión de las mezclas de hormigón con árido rPET supera la del hormigón de referencia. Este comportamiento mejora aún más con el aumento del contenido de árido casi esférico, mientras que, para áridos angulares, los mejores resultados se obtienen con una sustitución del 10% de árido natural.

[Qaidi et al \(2024\)](#)

Este estudio utiliza rPET como reemplazo parcial de áridos para probetas de hormigón. Se realizó un estudio experimental mediante la fabricación y prueba de 90 cilindros de hormigón y 54 cubos de hormigón. Se diseñó una mezcla de hormigón en la que el agregado fino natural fue sustituido parcialmente con desechos plásticos de rPET (PW) en una proporción del 0%, 25% y 50%, con diversas relaciones agua/cemento de 0.40, 0.45 y 0.55. Se evaluaron las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad.

De todos los ensayos realizados en este estudio los que analizaremos serán los de resistencia, porosidad. Esto para darnos un poco más de contexto de cómo afecta el rPET a los hormigones al ser utilizado como reemplazo parcial de áridos.

El cemento utilizado fue el Portland ordinario (OPC) tipo 1. Su propiedades físicas y mecánicas se presentan a continuación:

*Tabla 22: Requisitos físicos y mecánicos del cemento según norma iraní (Qaidi, et al., 2023)*

<i>Requisitos físicos y mecánicos</i>	<i>Resultados de la prueba.</i>	<i>Limitación (L.O.S.) (N° 5/1984) QOSQC (1984 a)</i>
<i>Tiempo de fraguado inicial (min)</i>	190	≥45
<i>tiempo de fraguado final (min)</i>	240	≤600
<i>Finura</i>	3.470	≥2,300
<i>Resistencia a la compresión 3 días (MPa)</i>	25	≥15
<i>Resistencia a la compresión 5 días (MPa)</i>	35	≥23

El agregado fino principal utilizado en este estudio es arena natural proveniente de la región de Khabor en la ciudad de Dahok, Irak. La arena natural fue tamizada para asegurar que la arena utilizada tuviera un tamaño máximo de partícula de 4.75 mm. La arena fina natural posee un módulo de fineza de 2.81, una gravedad específica de 2.7, una absorción del 1.14% y una densidad a granel de 1,634 kg/m<sup>3</sup>.

El agregado grueso natural proveniente del distrito de Seija en la ciudad de Dahok, Irak. Los agregados triturados fueron tamizados para asegurar que el tamaño máximo del agregado fuera de 19 mm. Luego, los agregados fueron lavados para eliminar impurezas y secados al aire libre antes de su uso en la producción de las mezclas de hormigón.

Las botellas de desecho de PET (tipo BC210) fueron procesadas y reutilizadas como reemplazo parcial del agregado fino en este estudio. Estas botellas de PET fueron suministradas por la Fábrica de Plásticos Light. Las propiedades del rPET utilizado se presentan a continuación:

Tabla 23: Propiedades rPET (Qaidi, et al., 2023)

<i>Propiedad</i>	<i>Resultados</i>
<i>Gravedad específica</i>	1.38
<i>Absorción de agua (24h)</i>	Nil
<i>Forma de Partículas</i>	Escamoso
<i>Espesor</i>	0.34mm
<i>Densidad aparente</i>	855 ± 10 kg/m <sup>3</sup>
<i>Color</i>	Blanco cristalino
<i>Temperatura de fusión</i>	230°C–255°C
<i>Resistencia a la tracción</i>	79.3 MPa
<i>Módulo de tracción</i>	4.0 GPa

Después de recibir las botellas de desecho de PET, se procesaron de la siguiente manera: (i) se quitaron las tapas de las botellas, seguidas del lavado y secado de las botellas, (ii) se trituraron y molieron las botellas de desecho de PET utilizando una máquina granuladora de plástico, y (iii) se tamizaron las botellas de desecho de PET molidas para obtener un agregado de rPET con un tamaño máximo de 4.75 mm. El proceso se encuentra en la siguiente ilustración:

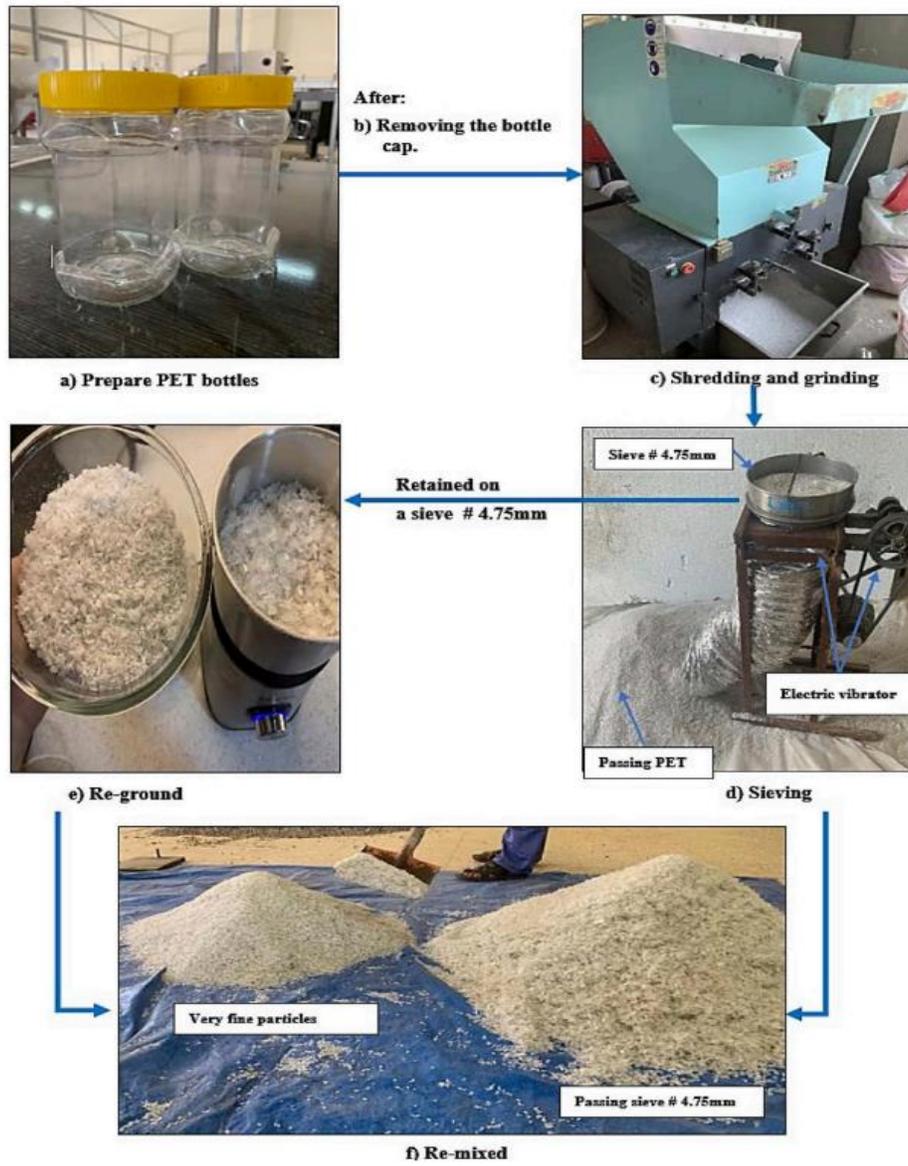


Ilustración 10: Método de reciclaje utilizado (Qaidi, et al., 2023)

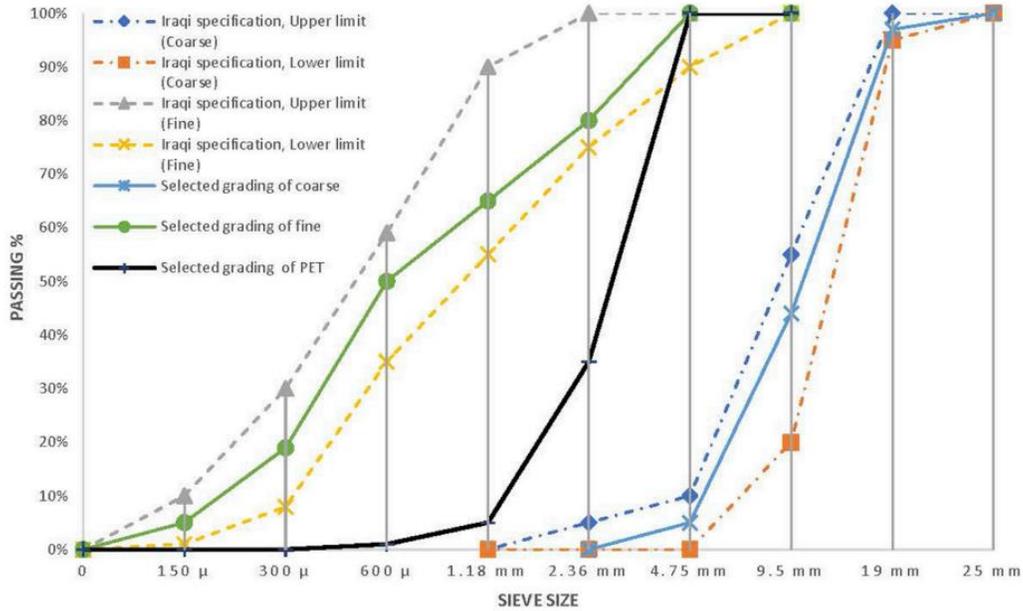


Ilustración 11: Distribución granulométrica (Qaidi, et al., 2023)

Tabla 24: Distribución de mezclas (Qaidi, et al., 2023)

ID mezcla	R0WC 40	R25WC 40	R50WC 40	R0WC 45	R25WC 45	R50WC 45	R0WC 55	R25WC 55	R50WC 55
w/c		0.4			0.45			0.55	
PET %	0%	25	50	0	25	50	0	25	50
Cemento	460	460	460	387	387	387	320	320	320
o									
Agua	174	174	174	174	174	174	174	174	174
Grava	955	955	955	955	955	955	955	955	955
Arena	861	645,7	430,5	880	660	440	940	705	470
PET	0	110,8	221,6	0	113,2	226,5	0	120,9	241,9
SP	4,14	4,14	4,14	3,29	3,29	3,29	2,81	2,81	2,81

Con respecto a la porosidad del hormigón, aumenta con el contenido de rPET y su relación agua/cemento (w/c) como muestra el estudio de Qaidi et al. (2024). La porosidad se midió tanto en cilindros de hormigón como en cubos de este, y se observó un incremento significativo en la porosidad con mayores proporciones de PET y relaciones w/c. De acuerdo con los autores dicho aumento en la porosidad puede atribuirse a la menor adherencia entre el PET y la matriz de cemento, así como a la formación de cavidades debido a la carente absorción de agua por parte del rPET.

La porosidad del hormigón aumenta con el contenido de rPET y la relación agua/cemento como indican los resultados del estudio, por ejemplo, para una relación w/c de 0.40, la porosidad aumenta de 9% con 0% de rPET a 20% con 50% de rPET. Para una relación de w/c de 0.55, la porosidad sube de 10% con 0% de rPET a 23,5% con el 50% de rPET. Este comportamiento es debido a la naturaleza hidrofóbica del PET y su forma irregular, que impide una correcta adherencia con la matriz de cemento, creando poros en la estructura de hormigón. Todo esto con respecto al grafico que se muestra a continuación:

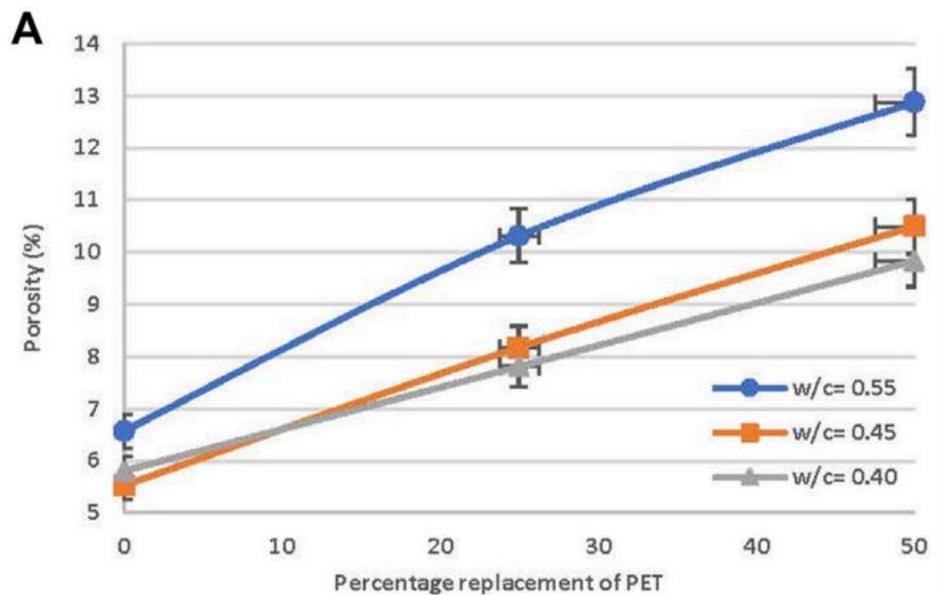


Ilustración 12: Porosidad vs %rPET (Qaidi, et al., 2023)

## Estudios de Hormigones con rPET sobre durabilidad

Este es el punto principal de este trabajo, se presentan estudios con ensayos en iones cloruro, penetración de cloruro, carbonatación ( $CO_2$ ) y penetración de agua. Estos estudios se llevan a cabo en hormigones con reemplazo parcial de áridos por rPET

### Estudios

R. Saxena et al (2018)

Este estudio a través de ensayos de probetas con diferentes proporciones de rPET como reemplazo parcial de árido en hormigón, analiza diferentes propiedades de las probetas, las cuales fueron: abrasión, resistencia, permeabilidad, entre otros.

Para toda la variedad de estudios se utilizaron 180 probetas cúbicas, 60 vigas y 60 probetas cilíndricas. Las probetas vienen con un reemplazo parcial del 0%, 5%, 10%, 15% y 20% de rPET como árido. A su vez cada porcentaje de reemplazo tiene una versión en rPET como material fino y rPET como material grueso.

Los materiales utilizados fueron cemento Portland ordinario de grado 43, la arena natural tiene una gravedad específica de 2,63 y la grava natural una de 2,74 ambas distribuciones granulométricas mostradas a continuación.

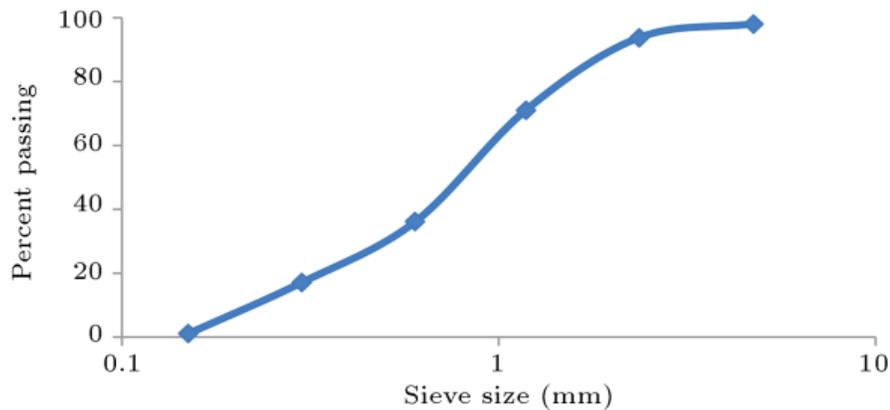


Ilustración 13: Distribución granulométrica arena (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020).

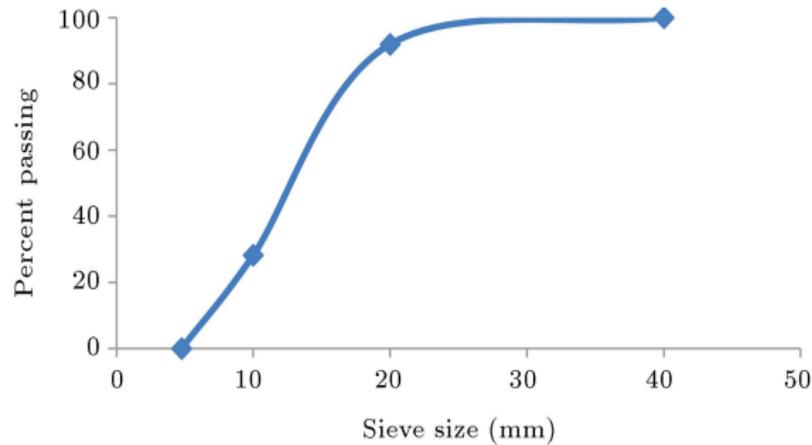


Ilustración 14: Distribución granulométrica grava (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020).

Tabla 25: Propiedades cemento (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020)

Propiedad Física	Requerimientos IS8112:2013 <sup>16</sup>	Resultados del ensayo
Consistencia	-	32%
Tiempo de fraguado inicial (min)	30	130
Tiempo de fraguado final (hr)	10 (máx.)	3,55
Gravedad específica	-	3,13
Resistencia a la compresión 7 días (MPa)	33	34,95
Resistencia a la compresión 28 días (MPa)	43	45,25

Las probetas fueron realizadas con la distribución mostrada en la tabla a continuación, con una proporción agua/cemento constante y con etiquetas claras para las probetas donde se le asigna una letra, F o C, donde F significa que el rPET reemplaza parcialmente la arena y la C que reemplaza parcialmente la grava, y además un número el cual representa el porcentaje de reemplazo de árido por rPET.

<sup>16</sup> IS 8112: 2013 - Ordinary Portland Cement, 43 Grade – Specification

Tabla 26: Mezclas de hormigón (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020)

Mezcla	Cemento	Fino	Grueso	rPET %	Proporción a/c
F0	1	1,54	2,76	0	0,45
F5	1	1,46	2,76	5	0,45
F10	1	1,39	2,76	10	0,45
F15	1	1,31	2,76	15	0,45
F20	1	1,23	2,76	20	0,45
C5	1	1,54	2,65	5	0,45
C10	1	1,54	2,48	10	0,45
C15	1	1,54	2,35	15	0,45
C20	1	1,54	2,21	20	0,45

Con todos estos datos entregados se presentan los resultados de los ensayos que se consideraron importantes para este estudio, la resistencia a la compresión y la penetración de agua, estos ensayos solo presentan un gráfico resumen con el valor exacto solo del 20% de reemplazo por lo que a continuación se presenta el gráfico directo de la fuente debido a que no se puede recrear sin datos exactos.

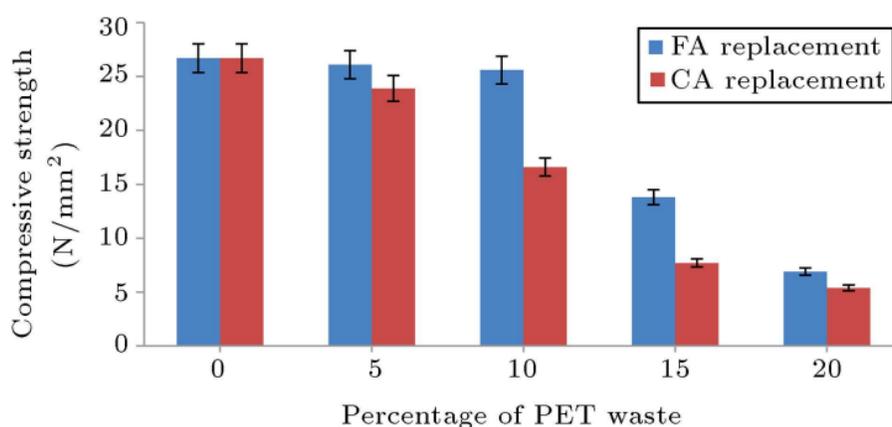


Ilustración 15: Gráfico resistencia a la compresión vs rPET % (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020).

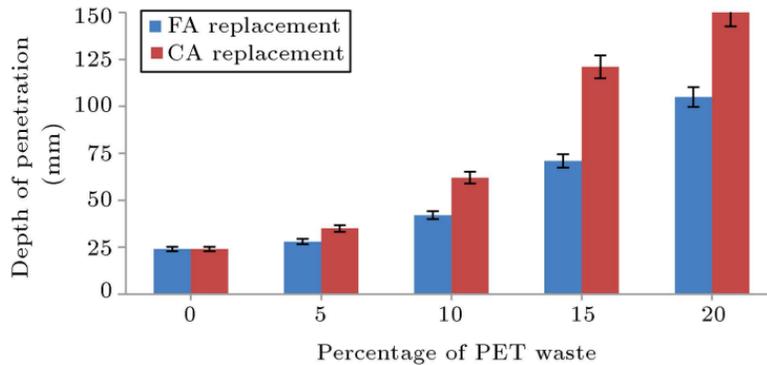


Ilustración 16: Gráfico penetración de agua vs rPET% (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020).

Para estos ensayos los autores utilizaron primeramente para la resistencia, la norma india IS516:1959. Para estudiar la permeabilidad se utilizó la penetración de agua de acuerdo con la norma alemana DIN1048<sup>17</sup>, la cual tiene el mismo procedimiento que la norma chilena NCh2262:2009.

Después de examinarlas conclusiones obtenidas por Saxena et al en su estudio con respecto al uso de rPET en hormigón, se destacan observaciones en varios aspectos. En primer lugar, identificaron una debilidad en la unión interfacial entre el rPET y la pasta de cemento, generando vacíos en la interfaz y, como resultado, disminuyendo la resistencia del hormigón plástico. Esto sugiere que la microestructura del material se ve afectada negativamente por la presencia de rPET.

En cuanto a las propiedades mecánicas del hormigón, Saxena et al. observaron una disminución tanto en la resistencia a la compresión como en la resistencia a la flexión a medida que aumentaba la proporción de rPET, ya sea como reemplazo del árido grueso o fino. Específicamente, la resistencia a la compresión disminuyó de 26.7 N/mm<sup>2</sup> a 5.4 N/mm<sup>2</sup>, mientras que la resistencia a la flexión disminuyó de 3.55 N/mm<sup>2</sup> a 1.79 N/mm<sup>2</sup>.

Al analizar la permeabilidad del agua, se confirmó un incremento cuando se aumentó la proporción de rPET en el hormigón, ya sea como reemplazo del árido grueso o fino. La profundidad de penetración del agua aumentó de 24 mm a 150 mm, indicando una mayor permeabilidad y posiblemente una menor durabilidad del hormigón en estas condiciones.

En resumen, las conclusiones de Saxena et al. sugieren que el Hormigón con rPET puede ser adecuado en aplicaciones que requieren mayor resistencia a la abrasión, como en pavimentos de carreteras, y en situaciones donde los parámetros de resistencia no son críticos. Se aconseja precaución al considerar la sustitución de

<sup>17</sup> DIN 1048-5: Testing concrete; testing of hardened concrete.

hasta un 5% de los áridos finos o gruesos con rPET, ya que, a este nivel, la mayoría de las propiedades se mantienen dentro de límites permisibles, aunque la resistencia puede verse comprometida en ciertas condiciones.

Lee, Zoe et al (2019)

Este estudio se enfoca en la evaluación de tres tratamientos químicos diferentes aplicados al rPET utilizado como reemplazo parcial en el hormigón. Estos tratamientos consisten en sumergir durante 24hrs el rPET en agentes oxidantes: peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), hipoclorito de calcio ( $Ca(ClO_2)$ ) y en agua como muestra de control ( $H_2O$ ). El rPET tratado se utiliza como material grueso en mezclas que sustituyen un porcentaje variable de árido natural en el hormigón, con niveles del 0%, 10%, 20% y 30% respectivamente.

El objetivo principal radica en analizar la influencia de estos tratamientos químicos y los diferentes porcentajes de reemplazo de árido natural por rPET en las propiedades del hormigón. Se consideran dos ensayos para este análisis: el de resistencia a la compresión y el de permeabilidad mediante el ensayo de profundidad de penetración de agua.

La metodología empleada implica la inmersión del rPET en los tratamientos químicos mencionados, seguido de su incorporación en las mezclas de hormigón. La evaluación se realiza con diferentes concentraciones de reemplazo para cada tratamiento, permitiendo así comparar y analizar el comportamiento del hormigón resultante en términos de resistencia mecánica y capacidad de resistir la penetración del agua.

Esta perspectiva experimental exhaustiva, busca entender cómo estas modificaciones inciden en las propiedades finales del hormigón. Los ensayos seleccionados, resistencia a la compresión y permeabilidad, se consideran fundamentales para evaluar la idoneidad del hormigón con rPET tratado como material estructural en diversas aplicaciones.

Los ensayos se realizaron con un material fino de gravedad específica de 2,79, para el material grueso esta es de 2,85 y para el agregado plástico una gravedad específica de 1,3. La distribución granulométrica de cada uno viene representada en la siguiente figura:

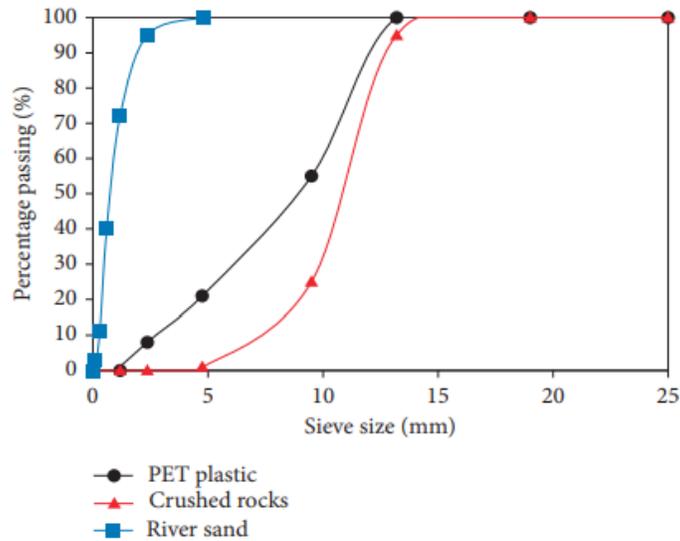


Ilustración 17: Distribución granulométrica ensayos (Lee, Paul, Kong, Susilawati, & Yang, 2019).

Para los ensayos de compresión fueron utilizadas probetas cúbicas de 100 mm de lado, y para las de penetración de agua 150 mm de lado. Estas últimas ensayadas siguiendo la norma BS EN12390-8:2000 la cual tiene el mismo procedimiento que el requerido en la norma chilena. Para los ensayos de resistencia a la compresión se utilizó la norma BS 1881-116:1983. La etiqueta utilizada para las probetas es la letra M acompañada de un número que representa el porcentaje de árido reemplazado por rPET. Para estas probetas las proporciones de mezcla fueron las representadas en la tabla a continuación. Y se prosigue con el gráfico que muestra los resultados del ensayo de resistencia a la compresión.

Tabla 27: Mezclas de Hormigón (Lee, Paul, Kong, Susilawati, & Yang, 2019)

Mixtur e	% Plástico	Radio agua/cemento	Agua (Kg/m <sup>3</sup> )	Cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	Árido Fino (Kg/m <sup>3</sup> )	Árido Grueso (kg/m <sup>3</sup> )	Árido Plástico (kg/m <sup>3</sup> )
M0	0	0.6	230	383	971	896	0
M10	10	0.6	230	383	929	679	179
M20	20	0.6	230	383	903	486	347
M30	30	0.6	230	383	882	305	509

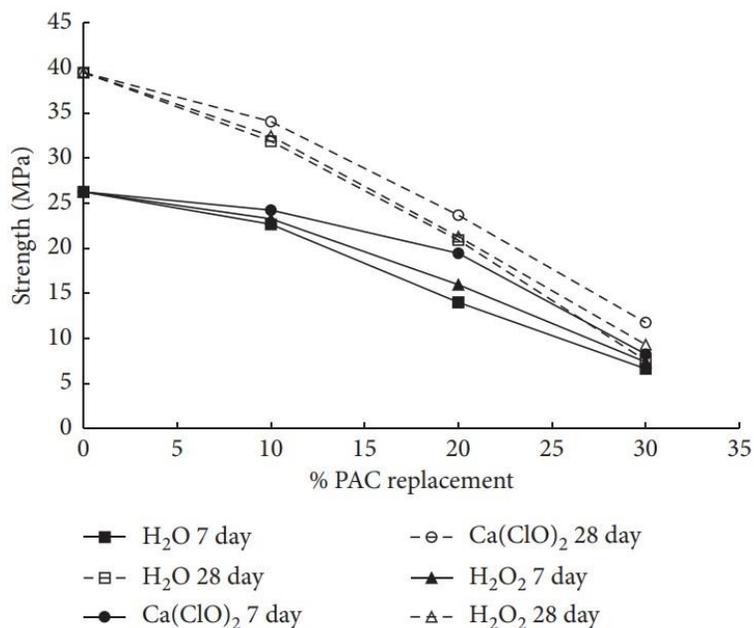


Ilustración 18: Resultados ensayos resistencia a la compresión (Lee, Paul, Kong, Susilawati, & Yang, 2019).

Tabla 28: Porcentaje de incremento de resistencias respecto a muestra control (Lee, Paul, Kong, Susilawati, & Yang, 2019)

Tipo de tratamiento	M10 (%)	M20 (%)	M30 (%)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1,8	1,8	25,2
Ca(ClO <sub>2</sub> )	6,9	13,2	55,9

Finalmente, para la permeabilidad del hormigón el ensayo solo se realizó a las probetas con reemplazo parcial del 20% debido a que basta con uno de los porcentajes para comparar resultados entre tratamientos, el de 10% afecta muy poco a la resistencia por lo que sería más difícil de notar la diferencia entre tratamientos, y se puede utilizar la del 30% debido a que su pérdida de resistencia es muy grande y no es utilizable realmente en hormigón estructural. Estos resultados en el estudio son entregados en mm/hr, aunque la norma utilizada exige el dato en mm totales, estos resultados pueden ser observados en la tabla a continuación.

Tabla 29: Resultados ensayo penetración de agua (Lee, Paul, Kong, Susilawati, & Yang, 2019)

Tratamiento	Penetración de agua (mm/hr)
H <sub>2</sub> O	1,96
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1,93
Ca(ClO <sub>2</sub> )	1,83

Sau et al. (2023)

El estudio detalla las propiedades mecánicas y de durabilidad de los compuestos de hormigón que incorporan agregados provenientes de polietileno reciclado (rPE) y rPET. Estos agregados reemplazan, respectivamente, al árido fino y grueso natural en la mezcla. Se realizaron una serie de pruebas para evaluar diversas características del hormigón resultante.

Entre las pruebas realizadas se encuentran: la resistencia a la compresión, sortividad, permeabilidad al agua, exposición a entornos agresivos como ácidos, bases, ambientes marinos y aguas residuales, resistencia al impacto, pérdida por abrasión (incluyendo pruebas de superficie y Cantabro), permeabilidad al gas, prueba de penetración rápida de cloruro (RCPT), evaluación a temperaturas elevadas y análisis de lixiviación de micro plásticos. Los experimentos se llevaron a cabo con diferentes niveles de reemplazo volumétrico, variando del 0% al 40% de los áridos convencionales por los elaborados con rPE y rPET, respectivamente. Además, estos ensayos se realizaron bajo distintos períodos de curado. La amplitud de este estudio permitió obtener una visión integral de cómo la incorporación de estos agregados alternativos afecta no solo la resistencia mecánica del hormigón, sino también su comportamiento frente a condiciones ambientales variadas y exposiciones a diferentes agentes agresivos.

La finalidad principal fue no solo determinar la viabilidad de la sustitución de áridos convencionales por estos materiales reciclados, sino también entender cómo influyen en las propiedades de resistencia y durabilidad del hormigón en un rango diverso de condiciones y situaciones prácticas. Esta evaluación representa un paso hacia la comprensión más precisa de la utilización de materiales reciclados en la mejora de las propiedades del hormigón.

Para todos estos ensayos se utilizó cemento portland puzolánico de grado 43<sup>18</sup>, como árido fino fue utilizada arena de río limpia y como árido grueso roca molida cuyas características pueden apreciarse en la Tabla 30. Además, como aditivo se usa superplastificador que sirve para mantener la trabajabilidad del hormigón al reducir considerablemente la relación agua/cemento.

Tabla 30: Propiedades áridos (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023)

Propiedad	Árido grueso natural	Árido fino natural
Gravedad específica seca	2,6	2,3
Gravedad específica saturada	2,76	2,66
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	1.650	1.600
Absorción de agua (%seco)	0,7	1,1

---

18

Cabe agregar los datos del cemento utilizado en la mezcla de hormigón, este fue evaluado de acuerdo con los requerimientos de la norma India IS-part-I, 1489.

Tabla 31: Propiedades cemento (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023)

Propiedad Física	Requerimientos (IS-part-I, 1489 <sup>19</sup> )	Resultados del ensayo
Consistencia (%)	-	34
Tiempo de fraguado inicial (min)	30	120
Tiempo de fraguado final	600	300
Solvencia	máx. 10	2
Resistencia a la compresión 7 días [MPa]	22	25
Resistencia a la compresión 28 días [MPa]	33	42,85

En este caso se entrega la información de cómo se obtuvo el rPET y además la granulometría de no solo el material natural sino también de los plásticos utilizados en los ensayos, todos estos datos quedan representados en las siguientes 2 imágenes entregadas por el estudio.



Ilustración 19: Proceso de reciclaje PET y PE (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023).

<sup>19</sup> Indian Standard PORTLAND-POZZOLANA CEMENT -SPECIFICATION (1991)

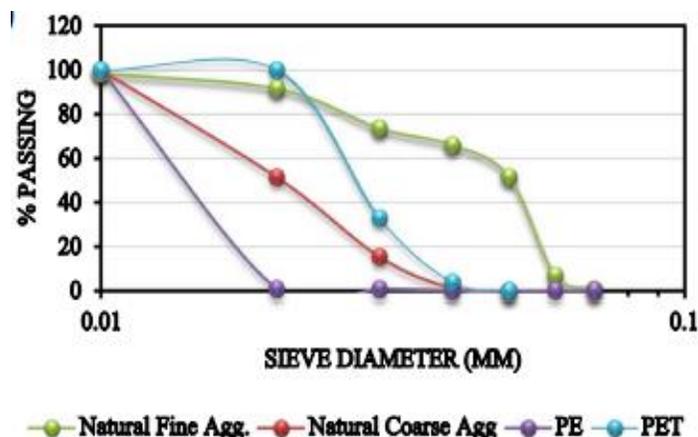


Ilustración 20: Granulometría árido natural y reciclado (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023).

Las propiedades físicas tanto del rPET como del rPE se detallan en la tabla 27, cabe destacar que, en este estudio, los áridos plásticos fueron calentados en arena para generar una mejor conexión con la pasta de cemento, esto es aplicando directamente lo que vimos en el estudio de Saika y De Brito (2014).

Tabla 32: Propiedades áridos plásticos (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023)

Propiedad	rPET	PE
Gravedad específica %	0,8-0,9	0,7-0,9
Absorción de agua %	0,44	0,005
Punto de fusión (°C)	130-180	100-150
Resistencia al impacto (J/m)	120	10-200
Módulo de Young (MPa)	1800	800
Módulo de finura (%)	6,5	2,6

Para el diseño de la mezcla fue utilizado el grado M30<sup>20</sup> de la norma IS10262(revisada):2019<sup>21</sup>, se utilizó una razón agua cemento de 0,37 constante para todas las probetas. Estas probetas se construyeron en 2 formas, cúbica de lado 100 mm y cilíndrica de 100 mm de radio y 200 de altura. Además, para etiquetarlas se utilizaron 3 categorías, según el tipo de plástico contenido y 4 números asignados que representan el porcentaje de reemplazo de árido por plástico, estos porcentajes son 10%, 20%, 30% y 40%, Las etiquetas son PE, PET y WPA (Mezcla de los 2). Las cantidades exactas de cada mezcla vienen dadas en la tabla a continuación.

<sup>20</sup> Equivalente a un G40 en Chile

<sup>21</sup> IS 10262:2019 - Concrete Mix Proportioning - Guidelines (Revised)

Tabla 33: Detalle Mezclas Probetas (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023)

Nombre de Mezcla	Porcentaje de reemplazo por plástico reciclado	Cantidad de cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad de agua (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad de árido fino (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad de árido grueso (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad de mezcla química (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad de árido PE (Kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad de árido PET (kg/m)
Control	0	410	165	690	1170	4,08	0	0
PE10	10	410	165	610,83	1170	4,08	22,09	0
PE20	20	410	165	542,96	1170	4,08	44,18	0
PE30	30	410	165	475,09	1170	4,08	66,27	0
PE40	40	410	165	407,22	1170	4,08	88,34	0
PET10	10	410	165	690	1083,238	4,08	0	43,6
PET20	20	410	165	690	962,88	4,08	0	87,22
PET30	30	410	165	690	842,52	4,08	0	130,82
PET40	40	410	165	690	722,16	4,08	0	174,43
WPA10	10	410	165	654,01	1131,38	4,08	26,17	9,3
WPA20	20	410	165	626,76	1059,16	4,08	52,33	18,6
WPA30	30	410	165	599,52	986,95	4,08	78,5	27,9
WPA40	40	410	165	572,26	914,73	4,08	104,66	37,21

Con el contexto completo de los ensayos se procede a entregar los resultados obtenidos de estos que pueden aportar al análisis que se busca hacer en este trabajo.

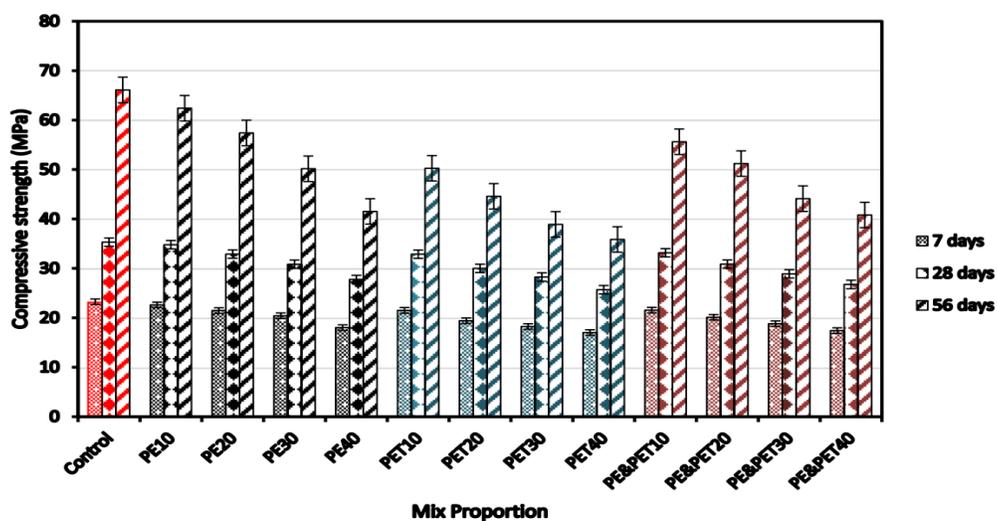


Ilustración 21: Resistencia a la compresión (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023).

Tabla 34: Penetración de agua (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023)

Especie	Penetración de agua promedio (cm)	Penetración de agua máxima (cm)
Control	1,76	2
PE10	2	2,1
PE20	2,03	2,5
PE30	2,4	2,6
PE40	2,6	2,8
PET10	2,53	2,6
PET20	2,6	2,68
PET30	2,76	2,89
PET40	3	3,2
WPA10	2	2,2
WPA20	1,8	2
WPA30	1,9	2,4
WPA40	2,2	2,5

En el estudio realizado por Sau et al., se exploraron las implicaciones derivadas del uso de áridos de PE y rPET en las propiedades del hormigón, sustituyendo áridos finos y gruesos naturales. Los resultados destacan que la resistencia a la compresión se ve afectada negativamente por la presencia de áridos plásticos, siendo la disminución más notable al reemplazar los áridos gruesos por rPET. Sin embargo, Sau et al. concluyeron que es aceptable un reemplazo de hasta el 30% en el caso del hormigón con áridos de rPE, sugiriendo la aplicabilidad de este tipo de hormigón mixto en estructuras ligeras.

En relación con la permeabilidad al agua, el estudio revela que el hormigón con áridos de rPET presenta una mayor permeabilidad en comparación con otras mezclas, atribuyendo este fenómeno al aumento de la porosidad debido a la débil unión entre los áridos y la matriz de cemento. Se observa que las aguas alcalinas, marinas y de desagüe no tuvieron un impacto adverso en el comportamiento del hormigón plástico, y Sau et al. observaron una mayor resistencia al ataque de  $SO_4$  en el hormigón a base de rPET.

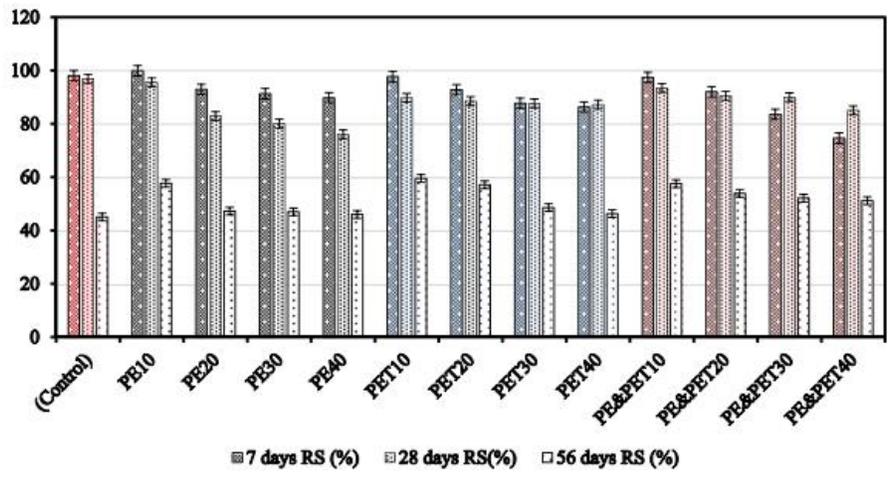


Ilustración 22: Resistencia residual (%) probetas guardadas en solución alcalina (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023)

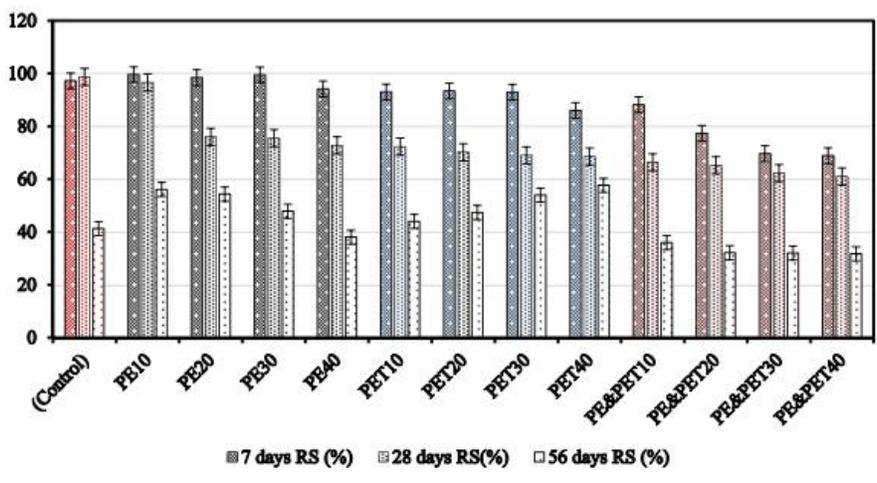


Ilustración 23: Resistencia residual (%) probetas guardadas en agua marina (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023)

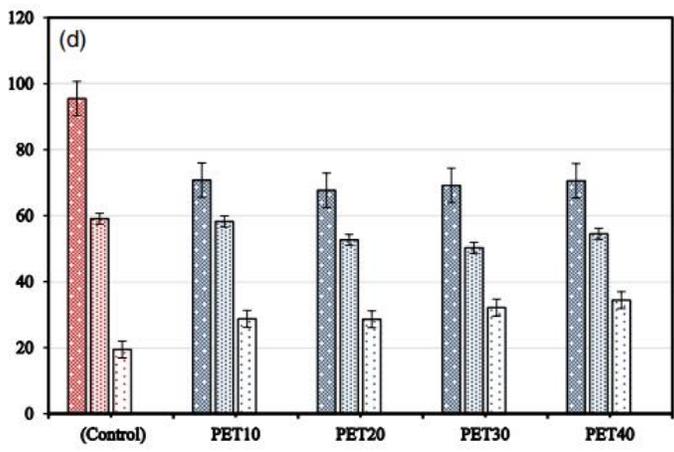


Ilustración 24: Resistencia residual de probetas guardadas en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

En relación con la penetración de cloruro, Sau et al. identificaron que la tasa es más alta en la mezcla de control, pero las mezclas con áridos plásticos presentan tasas significativamente más bajas. Esto significa que en presencia de áridos plásticos la penetración de cloruro es menor afectando así de menor manera al hormigón.

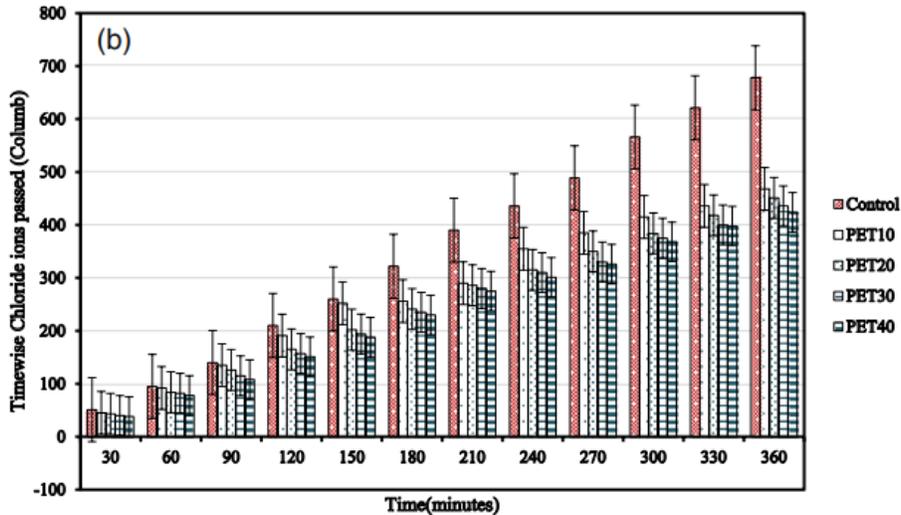


Ilustración 25: Penetración de ion-cloruro (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023)

El análisis microestructural realizado por Sau et al. revela que la estructura uniforme y lisa de los áridos plásticos resulta en una unión más débil con la matriz de cemento, generando una estructura porosa y propiedades mecánicas reducidas.

Silva, de Brito & Saika (2013)

Esta publicación tiene como objetivo estudiar hormigones con rPET como reemplazo parcial de áridos, desde el punto de vista de cómo pueden afectar las condiciones de curado a las propiedades de durabilidad del hormigón. De este estudio lo que interesa para el desarrollo del presente documento es el análisis de penetración de cloruros y carbonatación. (Silva, de Brito, & Saikia, 2013)

Para realizar estos estudios se produjeron tres tipos de probeta, cada una con diferente porcentaje de reemplazo de áridos naturales por rPET. Los tres porcentajes de reemplazo utilizados fueron 0%, 7,5% y 15%.

Para el estudio se escogió como árido grueso natural se utilizó calcáreo, como árido fino natural se utilizó cuarcita. Para el árido de rPET se utilizó tres tipos, árido grueso escamoso (PCA), árido fino escamoso (PFA) y árido liso fino (PPA).

Los detalles de las mezclas vienen a continuación:

Tabla 35: Mezclas de probetas (Silva, de Brito, & Saikia, 2013)

MEZCLAS	CEMENTO (kg/m <sup>3</sup> )	AGUA (kg/m <sup>3</sup> )	GRAVA NATURAL (kg/m <sup>3</sup> )	ARENA NATURAL (kg/m <sup>3</sup> )	PC (kg /m <sup>3</sup> )	PP (kg /m <sup>3</sup> )	PF (kg /m <sup>3</sup> )
RC	350	189	1003,1	800,6	-	-	-
C7.5PC	350	213,5	855	750,4	61,4	-	-
C7.5PP	350	185,5	1008,2	668,4	-	66,9	-
C15PP	350	182	1013,4	534,7	-	134,4	-
C7.5PF	350	196	992,7	660	-	-	64,2
C15PF	350	213,5	966,9	513,9	-	-	125

Ya con la materialidad del estudio explicada se procede a entregar los resultados de penetración de carbonatación y penetración de iones cloruro.

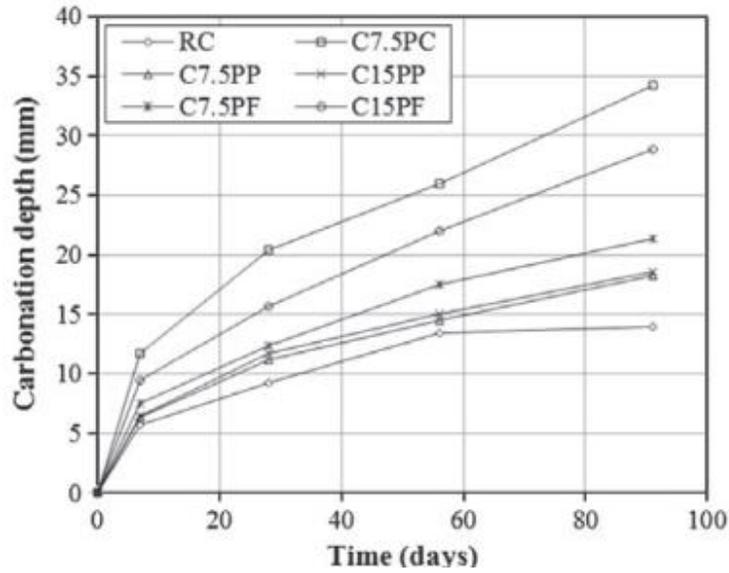


Ilustración 26: Profundidad de carbonatación en ambiente exterior

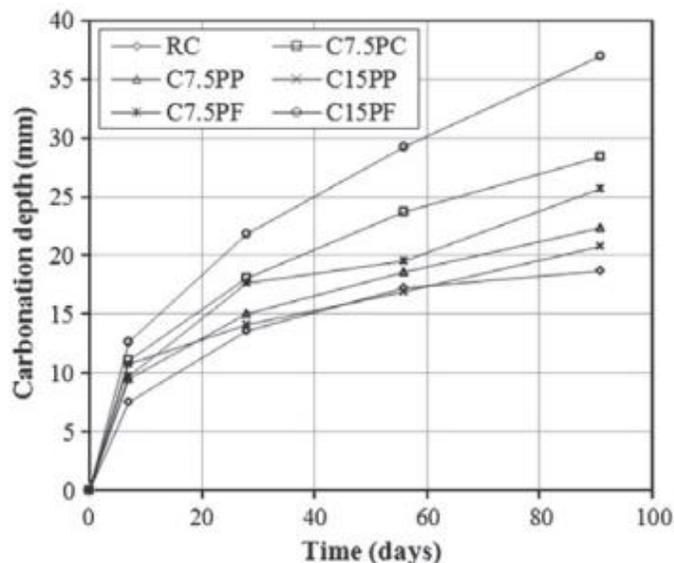


Ilustración 27: Profundidad de carbonatación en laboratorio

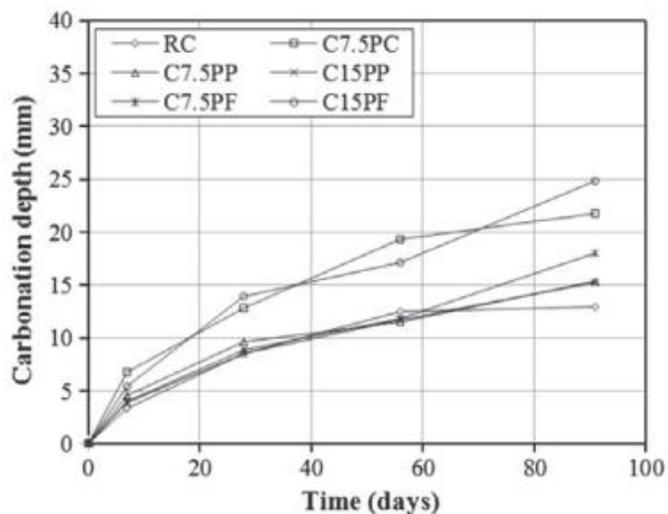


Ilustración 28: Profundidad de carbonatación en cámara húmeda

Tabla 36: Migración de cloruros ambiente exterior-

Código de mezcla	Ambiente exterior	
	coeficiente de migración a 91 días ( $\times 10^{-2} m^2/s$ )	Variación (%)
RC	12,2	0
C7.5PC	27,2	122,6
C7.5PP	16	31
C15PP	17,4	42
C7.5PF	16,1	31,6
C15PF	19,2	57,1

Tabla 37: Migración de cloruros laboratorio

Código de mezcla	Laboratorio	
	coeficiente de migración a 91 días ( $\times 10^{-2} m^2/s$ )	Variación (%)
RC	24,3	0
C7.5PC	30,1	24,2
C7.5PP	25,5	4,9
C15PP	28,7	18,5
C7.5PF	32,2	32,8
C15PF	38	56,4

Tabla 38: Migración de cloruros cámara húmeda

Código de mezcla	Cámara húmeda	
	coeficiente de migración a 91 días ( $\times 10^{-2} m^2/s$ )	variación (%)
RC	10,1	0
C7.5PC	12,7	24,9
C7.5PP	11,9	16,9
C15PP	11,3	11,2
C7.5PF	13,9	36,5
C15PF	16	57,7

## Memoria de calculo

En este capítulo se presentan los cálculos necesarios para llevar los resultados de los estudios a valores comparables con la norma NCh170.

Lee et al(2019) presenta los resultados de penetración de agua en mm/hr. Siguiendo las normas descritas anteriormente, que establecen un tiempo de ensayo de 72 horas, se realizó un cálculo para presentar los mm totales del ensayo, conforme a las exigencias de la norma chilena.

Tabla 39: Penetración de agua total (Lee, Paul, Kong, Susilawati, & Yang, 2019)

Tratamiento	Penetración de agua (mm/hr)	Penetración de agua (mm)
H <sub>2</sub> O	1,96	141,12
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1,93	138,96
Ca(ClO <sub>2</sub> )	1,83	131,76

De acuerdo con lo descrito por Sau et al (2023) al realizar el ensayo de penetración de agua modificaron el ensayo de la norma que exige una carga de 0,5MPa usando una carga de 0,3MPa. De todas formas, aplicando una variación de la ley de Darcy mencionada en el estudio de Sau podemos entregar la siguiente formula:

$$k_w = \frac{x^2}{2ht}$$

Donde k es el coeficiente de permeabilidad (m/s), x es la penetración de agua (m), t es el periodo de tiempo (s) y h es la altura de agua (m). De aquí podemos calcular un aproximado de la penetración de agua esperada si se varía la altura de presión de agua. Igualando el coeficiente de permeabilidad y el periodo podemos generar la siguiente formula.

$$X_2^2 = X_1^2 * \frac{h_2}{h_1}$$

Esta fórmula relaciona la altura de presión (h) y la profundidad de penetración(X) si una varia dentro del mismo coeficiente de permeabilidad como cambiaría la otra. Con esto utilizando el ensayo con altura 0,3MPa y penetración de acuerdo con los resultados de los ensayos, podemos predecir aproximadamente los resultados de penetración de agua con una altura de presión diferente, en este caso 0,5MPa.

Tabla 40: Calculo de penetración de agua

<b>Especie</b>	<b>Penetración de agua promedio (cm)</b>	<b>Penetración de agua máxima (cm)</b>	<b>Penetración de agua máxima calculada (cm)</b>
PET10	2,53	2,6	3,36
PET20	2,6	2,68	3,46
PET30	2,76	2,89	3,73
PET40	3	3,2	4,13

## Discusión y Análisis de estudios

Para llevar a cabo el análisis de los distintos estudios en relación con las disposiciones establecidas en este trabajo, resulta necesario comparar los hallazgos, con los requisitos de durabilidad estipulados por la normativa chilena NCh170 vigente. A fin de lograr una evaluación satisfactoria, es esencial abordar cada punto de la norma, examinando de manera detallada cada uno de los estudios.

Es importante mencionar que no existen estudios realizados con la norma chilena por lo que se deberá extrapolar los resultados obtenidos en ensayos de normas extranjeras, las cuales fueron utilizadas en los estudios revisados.

### Agentes internos

#### Contenido total de sulfatos

Como expuso Ji(2013) el PET virgen no presenta sulfatos como parte de su contenido. De esta forma el aporte que este da al contenido total de sulfatos en el hormigón es nulo.

Luego de esto al ser el material de estudio el rPET es importante saber si el proceso de reciclaje aporta sulfatos al rPET de alguna forma. Los procesos expuestos en este trabajo muestran que los sulfatos no forman parte de los contaminantes del proceso de reciclaje por lo que el rPET no posee ninguna fuente de sulfatos como se puede ver en la Tabla 41 y de aquí este no aporta de ninguna forma al contenido total de estos en el hormigón.

#### Contenido total de cloruros

En primer lugar, al observar el PET virgen carece de cloruros. Esta observación conduce a la conclusión de que el PET no contribuye en ninguna medida, al contenido total permitido en el hormigón según las normativas establecidas. Ya pasando al rPET hay otras consideraciones que tomar en cuenta.

En primer lugar, se centra la atención en los posibles contaminantes que podrían surgir durante el proceso de reciclaje. Esta perspectiva es decisiva, ya que, todos los estudios incluyendo el presente trabajo, se concentran en la utilización de rPET como sustituto parcial de áridos, en lugar de optar por el PET virgen. La consideración de los contaminantes potenciales se convierte así en un elemento esencial para evaluar la viabilidad y seguridad del rPET en el hormigón.

En segundo lugar, se aborda la capacidad del rPET para resistir estos elementos contaminantes. Si el PET resulta ser vulnerable ante estos contaminantes, las cantidades máximas que el hormigón puede aceptar se verían reducidas, ya que la presencia de elementos susceptibles a la contaminación podría limitar su uso efectivo. Esta perspectiva destaca la importancia de evaluar la resistencia intrínseca

del rPET a los contaminantes, asegurando así la integridad y durabilidad del hormigón modificado con este material reciclado.

Con esto claro, se presenta la Tabla 41, donde se expone un resumen de los contaminantes del proceso de reciclaje que se obtienen del estudio de Al-Sabagh et al. Como se puede ver en el capítulo de marco teórico estos contaminantes se pueden obtener en el proceso de reciclado de Chile debido a que los procesos de reciclaje se encuentran con estos problemas planteados por el estudio.

*Tabla 41: Resumen de contaminantes en el reciclaje del PET*

Contaminantes		Problemas
Ácidos	Acético	Funcionan como catalizadores para la ruptura de cadenas durante la fusión
	Resina	
	Clorhídrico	
Otros	Agua	Genera hidrolisis
	Colorantes	Colores indeseados
	Acetaldehído	Daña el contenido

Es importante mencionar que la presencia de ácidos en el reciclaje de PET proviene de la degradación de otros plásticos presentes en la mezcla, lo cual puede ser un factor para tener en cuenta. En el estudio de cloruros es importante estudiar el ácido clorhídrico, cuya fuente en este contexto es la degradación del PVC y su posterior quemado durante la fusión. La facilidad de mezclar PVC con PET, dado su uso común en envases y etiquetas, se ve acentuada por el hecho de que la separación de plásticos en el proceso de reciclaje en Chile puede ser tanto manual como mecánica, lo que introduce un margen adicional para posibles errores.

Aun así, al ser en Chile el proceso de reciclaje mecánico y no utilizar el método de fusión, esto imposibilita la generación de ácido clorhídrico a través del quemado de los materiales resultantes de la descomposición del PVC. Por lo que se puede concluir que el rPET no aporta de ninguna manera cloruros y no se ve afectado por estos en las condiciones planteadas por el capítulo de durabilidad.

#### Reacción ácido-álcali

La siguiente consideración, es relevante destacar que la norma aborda la reacción ácido-álcali, estableciendo criterios para ácidos catalogados como reactivos ante el álcali, los cuales deben cumplir con los requisitos específicos de la NCh170. Dado que el PET no se encuentra clasificado como ácido según la normativa, lógicamente no figura en la lista de ácidos reactivos. Para este estudio no se encontraron fuentes sobre este apartado de la norma con respecto al rPET.

De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ji (2013) en las propiedades químicas, se revela que el PET es débil ante la presencia álcali, indicando su propensión a degradarse en presencia de esta sustancia. Al extrapolar esta información, surge la posibilidad de considerar al rPET como un potencial árido reactivo. Este hallazgo añade una dimensión al análisis de la idoneidad del rPET en aplicaciones de construcción, demostrando la importancia de evaluar no solo la normativa vigente, sino también las propiedades intrínsecas del material en cuestión.

Considerando la información que se posee en la actualidad con respecto a los agentes internos, se destaca que la presencia de cloruros extra está prácticamente asegurada. Sin embargo, si el proceso de reciclaje no incluye fusión, el contaminante PVC al descomponerse no se quema por lo que no forma estos cloruros extra.

*Tabla 42: Resumen comparación de agentes internos*

<b>AGENTE INTERNO</b>	<b>RPET</b>
<b>CONTENIDO TOTAL DE SULFATOS</b>	No aporta sulfatos
<b>CONTENIDO TOTAL DE CLORUROS</b>	No aporta cloruros
<b>REACCION ÁRIDO-ÁLCALI</b>	Débil al álcali

## Agentes externos

### Análisis preliminares

Para esto los estudios del capítulo Estudios de Hormigones con rPET sobre durabilidad que abarcaron tanto penetración de agua, penetración de cloruros, penetración de carbonos y perdida de resistencia en entornos que generan corrosión.

Para la penetración de agua utilizan la norma alemana DIN1048 y la norma europea EN12390, ambas normas con el mismo procedimiento que la norma chilena, Sau et al menciona que la carga de agua utilizada en el ensayo corresponde a 0,3 MPa, pero la norma que cita (DIN1048) exige una carga de 0,5 MPa al igual que la norma europea y la chilena.

Con el contexto aclarado es necesario comparar los resultados de los ensayos con lo requerido por la norma. Primero si se analiza el estudio de Sau es posible notar que la resistencia a 28 se va reduciendo a medida que se le agrega más % de rPET, con esto la resistencia que en el hormigón de control es de 35 MPa baja hasta los 25 MPa (ver Ilustración 21) con un 40% de reemplazo. Cabe destacar que con un 10% de reemplazo la diferencia es casi imperceptible con la de control. Con respecto a la penetración de agua Sau es quien más ensayos realizó y cómo

podemos ver en la Tabla 34 la tendencia es que mientras más reemplazo de árido por rPET mayor es la penetración de agua.

Con respecto a Saxena (2016) ocurre lo mismo con respecto a cómo evolucionan la permeabilidad (Ilustración 16) y la resistencia a la compresión a 28 en función de la cantidad de rPET en la mezcla (ver Ilustración 15), a medida que el porcentaje de reemplazo de árido por rPET es mayor la permeabilidad es mayor y la resistencia es menor.

Y para terminar esta sección queda Lee (2019) la que utiliza dos técnicas de tratamiento químico del rPET para alisar la superficie y que con esto quede menos agua en las imperfecciones del rPET, la cual es agua que no será absorbida y al evaporarse generará poros. En los dos casos, más el caso base que es un baño con agua en vez de químicos, la resistencia disminuye a medida que el porcentaje de rPET en la mezcla es mayor (ver Ilustración 18) pero los tratamientos químicos amortiguan la caída de resistencia. Con respecto a la penetración de agua se confirma que las técnicas utilizadas para mejorar la resistencia también mejoran la penetración de agua (ver Tabla 29) lo que significa que atacan un problema en común.

#### Ciclos hielo y deshielo

Aunque el rPET puede satisfacer fácilmente ciertos requisitos, como el tamaño nominal de árido, es esencial mencionar que, para evaluar el contenido de aire total, se requiere el ensayo detallado en la norma NCh2185. Lamentablemente, hasta el momento no se ha registrado la realización de dicho ensayo en hormigones que incorporan reemplazo parcial de árido por rPET.

Esta falta de evidencia experimental específica respecto al ciclo hielo y deshielo en mezclas con rPET no permite análisis con respecto a los requisitos de la norma.

#### Ataque externo de sulfatos

Para analizar el ataque externo de sulfatos hay que mencionar las exigencias de la norma, esta presenta primero una catalogación de acuerdo con los grados de exposición y al tipo de exposición (ver Tabla 6), y de acuerdo con esto cada nivel tiene distintos requisitos como se puede ver en la Tabla 8. Conforme a dichos criterios, los requisitos fundamentales para el hormigón incluyen no solo una resistencia mínima sino también una permeabilidad máxima, evaluada a través del ensayo de penetración de agua, cuya metodología se encuentra definida en la norma NCh2262.

Como se ha observado previamente, los tres estudios analizados que incorporan ensayos de penetración de agua siguen normativas equivalentes a la NCh2262. Esto facilita la comparación directa de los resultados obtenidos con los estándares

establecidos por la norma. La metodología para esta comparación se centrará en identificar el máximo nivel de exposición que cumple con los requisitos de resistencia, para luego analizar los resultados de permeabilidad en ese grado.

En el caso de Saxena, es relevante destacar que, para el análisis, solo se considerarán las probetas en las cuales el reemplazo de árido se realizó en forma de árido fino. Se ha observado que cuando el reemplazo se efectúa en forma de árido grueso, las consecuencias para la resistencia son más desfavorables, generando una mayor disminución de la resistencia (ver Ilustración 15) y un aumento más pronunciado de la permeabilidad (ver Ilustración 16).

Dado este contexto, se someterán a análisis únicamente las probetas con un reemplazo del 5% y del 10%, ya que se encuentran justo en el umbral de la resistencia de 25 MPa, requerida por el menor grado de exposición. Según el gráfico de la Ilustración 16 y considerando que el máximo permitido por la norma es de 40 mm de penetración de agua para el primer grado de exposición, la probeta de control y la de 5% cumplen con la exigencia máxima de permeabilidad. Aunque la probeta de 10% parece estar en un caso límite, se considerará que también cumple, si bien este resultado puede variar entre ensayos debido a su naturaleza límite.

Para el análisis de los resultados presentados por Lee, se seguirá el mismo método. En este caso, Lee solo presenta la penetración de agua en probetas con un reemplazo del 20%, ya que considera que con un mayor reemplazo la caída de resistencia es significativa y, en menor medida, el reemplazo es demasiado bajo para notar la diferencia que genera el tratamiento químico al reemplazar el árido por rPET.

Si bien se puede notar que los tratamientos químicos utilizados por Lee et al (2019) mejoran tanto la resistencia como la penetración de agua en comparación al caso base de tratado con agua consiguiendo como dice en la Tabla 39 resultados con hasta 10 mm menos, las probetas creadas en la norma presentan una alta permeabilidad lo que aleja los resultados de la penetración de agua de cualquier exigencia de la norma sin poder cumplir ninguna exigencia impuesta en ella.

Con los cálculos necesarios hechos en la memoria de cálculo se presenta una tabla resumen con las penetraciones de agua más bajas de cada estudio, para así compararlas en este apartado y en el siguiente con lo que exige la norma.

Tabla 43: Comparación resultado de estudios vs exigencia de la norma para ataque externo de sulfatos

ESTUDIO	SAXENA ET AL (2018)	LEE ET AL (2019)	SAU ET AL (2023)	EXIGENCIA NORMA NCH170 ATAQUE EXTERNO DE SULFATOS	
				Categoría	Valor Requerido (mm)
<b>PENETRACIÓN DE AGUA (MM)</b>	26	141	33,6		
%PET	5	20	10	S1	≤40
<b>PENETRACIÓN DE AGUA (MM)</b>	43	139	34,6	S2	≤30
%PET	10	20	20	S3	≤20
<b>PENETRACIÓN DE AGUA (MM)</b>	74	132	37,3		
%PET	15	20	30		

Esto se debe comparar con la norma chilena en el apartado de sulfatos, es importante aclarar que solo se utilizó los tres valores más bajos de penetración de agua de cada estudio, en Saxena et al (2018) solo se utilizó el reemplazo de áridos por rPET como material fino y no el grueso debido a su mayor impacto en la permeabilidad y resistencia.

Si se compara con la Tabla 8 el estudio de Saxena cumpliría solo la probeta del 5% con parte de la norma, las cuales serían las categorías desde S2 y las menos exigentes. Por penetración de agua, pero por resistencia solo cumple hasta S1.

Lee et al (2019) presenta resultado de permeabilidad que en el caso menos exigente (S1) sigue siendo más de 3 veces el valor deseado. Teniendo su menor penetración en 132mm vs un valor máximo permitido de 40 mm.

Siguiendo las mismas pautas Sau et al (2023) presenta tres resultados que sirven para cumplir con las exigencias de S1. Sabiendo que su resistencia es entre 30MPa y 40MPa es claro que cumplen con todos los requisitos.

Siguiendo con Sau et al hay otro estudio que tomar en consideración para este apartado, los ensayos sobre resistencia residual al exponerse a sulfatos (ver Ilustración 24). Es claro viendo la imagen que si bien la pérdida de resistencia los primeros 9 días del hormigon sin rPET es baja en comparación a los con rPET mostrando más de un 90% de la resistencia original al dalo del 70% aproximado de todas las muestras con rPET a 28 días las pérdidas porcentuales ya están casi igualadas y a los 56 días mientras más rPET posean más resistencia residual tendrán, partiendo con un valor cercano al 20% de la resistencia original en la muestra de control llegando a un valor aproximado de 35% en las probetas con 40% de rPET.

### Ataque externo de agentes que provocan corrosión

Para estos agentes externos se exige menos resistencia para la misma penetración de agua, lo que es igual a una mayor exigencia de penetración de agua para una misma resistencia en la NCh170. Es importante señalar que dentro de los cloruros existe el ácido cloruro el que rompe las cadenas del PET lo cual puede generar que la exposición a cloruros afecte en mayor medida al hormigón con rPET que al tradicional por el cual está formada la norma.

Antes de continuar con el análisis a través de la norma chilena, el cual consiste en comparar los valores de penetración de agua ya estudiados en el apartado anterior con los exigidos en la norma NCH170 en el apartado de agentes que provocan corrosión (ver Tabla 10), es importante mencionar ciertos ensayos llevados a cabo por los estudios aquí analizados.

Primero Sau estudia la penetración de cloruros a través de la ASTM 1202 la cual estudia directamente el paso de carga de cloruros a través del hormigón distinto a la norma chilena que lo evalúa indirectamente con permeabilidad que es solo uno de los tantos factores que la afectan.

Los resultados expuestos por Sau et al (2023) de acuerdo con la Ilustración 25 nos entrega que mientras más rPET menor será la penetración de cloruros estando el hormigón con rPET con un traspaso de aproximadamente 400C lo cual contrasta con la carga cercana a 700 del hormigón sin rPET.

En contraste Silva et al (2013) llega a resultados contrarios, donde conductividad del hormigón aumenta al contener rPET como árido, cabe destacar que este ensayo no es el mismo realizado por los otros 2 estudios.

De la misma manera Silva et al(2013) presenta ensayos de carbonatación de probetas (ver Ilustración 26, Ilustración 27, Ilustración 28). Viendo que la penetración de carbonos aumenta con la presencia de rPET como árido. Llegando en la probeta de rPET como árido grueso a más del doble que la probeta sin rPET. Y al igual que en los estudios de resistencia y permeabilidad de agua de Saxena (2018) muestra que usar rPET como árido grueso afecta aún más la calidad del hormigón. Además de coincidir con Saika & de Brito (2014) que usar áridos de rPET con superficie lisa da mejores resultados que con superficie escamosa.

Para comparar los resultados con la norma utilizaremos la tabla a continuación la cual muestra los ensayos y las categorías de exigencia de la norma.

Tabla 44: Comparación resultados estudios vs norma NCh170 ataque externo de agentes que provocan corrosión

Estudio	Saxena et al (2018)	Lee et al (2019)	Sau et al (2023)	Exigencia norma NCh170 ataque externo de agentes que provocan corrosión	
				Categoría	Valor Requerido (mm)
penetración de agua (mm)	26	141	33,6		
%PET	5	20	10	C1	≤50
penetración de agua (mm)	43	139	34,6	C2-A	≤40
%PET	10	20	20	C2-B	≤30
penetración de agua (mm)	74	132	37,3	C2-C	≤20
%PET	15	20	30		

Con esto es mente solo queda mencionar que Saxena (2018) cumple hasta C2-B (ver Tabla 9) en esta categoría con su probeta con 5% de rPET, el de 10% puede cumplir al límite con c1 y todas las probetas de Sau cumplen hasta C2-A. Los resultados de Lee no cumplen con el requisito menos exigente de C1 teniendo más del doble de penetración de agua.

#### Hormigones de baja permeabilidad

En esta sección, la atención se centra exclusivamente en los resultados de penetración de agua, y es importante destacar que únicamente se presentan dos casos con restricción máxima de penetración de agua, como se muestra en la Tabla 11. Como se ha observado en secciones anteriores de este análisis, ninguno de los estudios evidencia una permeabilidad inferior a una penetración de agua de 20 mm, lo que implica que en ningún caso se cumplen los requisitos para la categoría P2.

Tabla 45: Comparación estudios de penetración de agua vs exigencias de la norma NCh170 hormigones de baja permeabilidad

Estudio	Saxena et al (2018)	Lee et al (2019)	Sau et al (2023)	Exigencia norma NCh170	
				Categoría	Valor Requerido (mm)
penetración de agua (mm)	26	141	33,6		
%PET	5	20	10	P1	≤40
penetración de agua (mm)	43	139	34,6	P2	≤20
%PET	10	20	20		
penetración de agua (mm)	74	132	37,3		
%PET	15	20	30		

Tanto Saxena como Sau cumplen con los requisitos establecidos para la categoría P1, que tiene restricciones menos estrictas en términos de penetración de agua. Saxena logra cumplir con los estándares de permeabilidad limitándose al 5% y 10% de reemplazo, considerando la notable disminución porcentual de resistencia que se observa con mayores porcentajes de reemplazo. Por su parte, Sau solamente descarta los hormigones con un 40% de reemplazo.

Estos resultados indican que, aunque ninguno de los estudios analizados cumple con los requisitos de permeabilidad establecidos para la categoría P2, los trabajos de Saxena y Sau demuestran la posibilidad de obtener resultados satisfactorios al implementar restricciones específicas en el porcentaje de reemplazo de árido, cumpliendo así con los estándares de la categoría P1.

Para terminar con las secciones de penetración de agua es importante dejar cuantificada la relación agua/cemento con el porcentaje de rPET, para esto en el siguiente gráfico presentamos una aproximación que es bastante representable sobre todo en porcentajes de rPET como reemplazo de árido que fueron estudiados, debido a que fuera de estos márgenes (5%,40%) se tiende a un comportamiento no lineal.

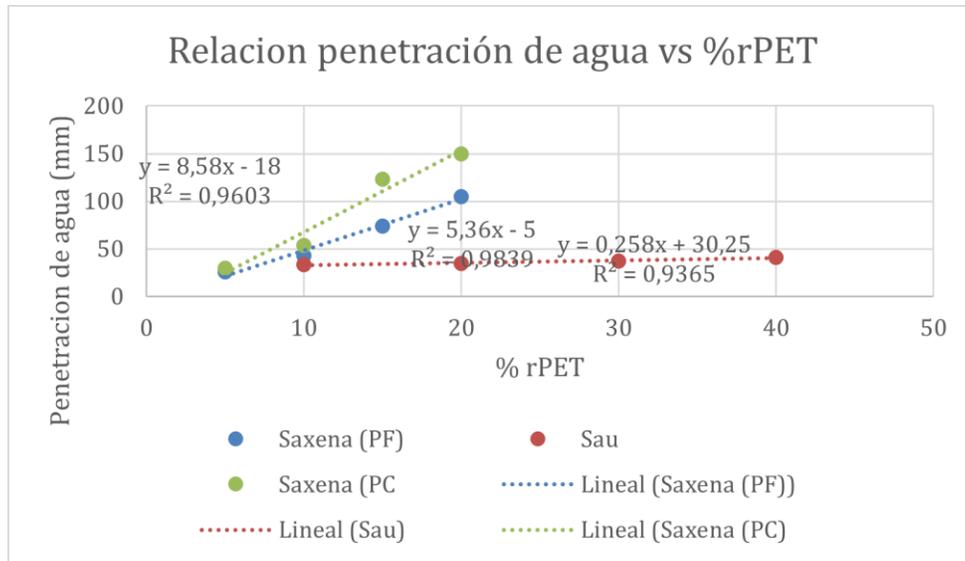


Ilustración 29: Relación penetración de agua vs % rPET

### Otros análisis

Si bien el propósito explícito de este trabajo consiste en la comparación de estudios internacionales con la normativa vigente, es importante profundizar en otros aspectos abordados por dichos estudios. Además de los que se pudo obtener de los estudios en el capítulo Estudios de otras características del hormigón con rPET.

### Tamaño rPET

Para determinar el tamaño adecuado del rPET en la mezcla de hormigón, es importante examinar detalladamente los resultados de diversos estudios que abordan el uso de áridos gruesos y finos. Saika & de Brito, en su análisis, comparan el rPET con un tratamiento térmico y sin tratamiento, dividiendo incluso los grupos sin tratamiento en probetas con solo material fino y solo material grueso. La Ilustración 9 destaca que la disminución de resistencia al aumentar el porcentaje de rPET en la mezcla es más pronunciada al emplear rPET de tamaño nominal del árido grueso. Como muestra la Tabla 46 hay una pérdida de más del 50% con áridos gruesos y solo del 10% con áridos finos lisos.

Tabla 46: Resumen resistencia a compresión Saika y de Brito (MPa)

rPET	PC	PF	PP
5%	32	35	38
10%	22	31	36
15%	15	25	34

De manera similar, Saxena et al. aportan resultados significativos en este contexto. Al observar la Ilustración 15 y la Ilustración 16, se puede concluir claramente que el rPET utilizado como material grueso muestra una disminución más marcada de la resistencia y un aumento más significativo de la permeabilidad. Como se puede notar en la Tabla 47 el árido de rPET grueso (PC) pierde resistencia rápidamente al agregarse más % de reemplazo en cambio el árido fino de rPET decrece su resistencia en menor medida.

Tabla 47: Resumen resistencia a la compresión Saxena

rPET	Resistencia a la compresión MPa	
	PC	PF
5%	22	24
10%	17	23
15%	7	14
20%	4	6
control	25	

Es relevante señalar como punto final de este apartado que Carreño, al proporcionar su dosificación recomendada, opta por utilizar exclusivamente rPET como reemplazo de árido fino. Esta elección parece derivar de un análisis de diversos estudios de resistencia del hormigón, respaldando la idea de que el rPET, cuando se incorpora como árido fino, puede ser más beneficioso en términos de mantenimiento de la resistencia.

#### Microestructura

En términos generales, las conclusiones extraídas de los estudios realizados por Lee et al(2019), Saika y de Brito(2014) y Saxena et al(2020) convergen en la idea de que la disminución en la calidad del hormigón al incorporar reemplazos de áridos por rPET se origina principalmente en el aumento de la porosidad en los hormigones resultantes. Estos estudios coinciden al señalar que la baja interacción entre la matriz de cemento y las partículas de rPET conduce a la acumulación de agua no absorbida, generando poros adicionales durante el proceso de evaporación. Estos poros adicionales no están presentes en el hormigón convencional. En consecuencia, cualquier enfoque que aborde este problema en la zona de transición de interfaz podría mejorar la resistencia y reducir la permeabilidad del hormigón.

En este contexto, se han llevado a cabo dos estudios que proponen modificaciones al rPET con el objetivo de mejorar su interacción con la matriz de cemento. Lee ha

adoptado un enfoque químico, curando el árido de rPET previo a la mezcla con 2 químicos distintos que muestra la Tabla 28, aunque los resultados positivos obtenidos en las propiedades mejoradas no son considerablemente significativos, ya que aún se encuentran más cercanos a las muestras con rPET no tratadas que al hormigón tradicional.

Por otro lado, Saika & de Brito aplicaron un método más efectivo al utilizar un tratamiento térmico. Este método ha demostrado mejoras en la resistencia y permeabilidad en comparación con el material fino no tratado. Es relevante destacar que este tratamiento acerca aún más el comportamiento del hormigón con rPET tratado al del hormigón convencional, superando a las muestras de rPET no tratado.

#### Relación agua cemento

En el ámbito de la construcción, se reconoce que la relación agua-cemento guarda una proporción inversa con la resistencia a la compresión. No obstante, esta relación plantea un desafío, ya que, al reducir la cantidad de agua, la trabajabilidad del material se ve considerablemente comprometida. En este contexto, se suma el conocimiento acerca de la baja absorción de agua del rPET como muestran la Tabla 23 y la Tabla 32, material reciclado de botellas de plástico, y cómo la presencia de agua en contacto con la superficie del rPET puede resultar en una mayor formación de poros.

De acuerdo con la investigación realizada por Sau, quien, mediante el uso de una relación agua/cemento baja, logra resolver la cuestión de la trabajabilidad mediante la incorporación de un aditivo plastificante. Este enfoque ha demostrado obtener resultados superiores según los estándares de la normativa correspondiente, como podemos ver en la Tabla 48 la reducción de resistencia llega a un máximo de 32% o sea que la resistencia final con 40% de rPET es un 68% de la de control. Esto muestra una diferencia considerable con los otros resultados analizados. Usando una relación agua/cemento del 40%.

Tabla 48: Resumen de resistencia a la compresión (Sau, Shiuly, & Hazra, 2023)

rPET	Resistencia a la compresión (MPa)
10%	33
20%	30
30%	27
40%	24
control	35

Finalmente se debe mencionar el estudio de Qaidi et al (2023) el cual presenta la variación de la porosidad no solo al aumentar el rPET como árido, si no a demás con cambios de relación a/c como se puede observar en la Tabla 49. Con estos datos podemos notar que el rango bajo del a/c de los hormigones con rPET es más utilizable debido a que bajo los 0,45 de a/c no se aconseja en hormigones tradicionales, pero en rPET mejora sus característica como muestra el 0,4 de a/c que presenta una porosidad mayor que el a/c de 0,45 en el hormigon sin rPET.

*Tabla 49: Resumen porosidad (Qaidi, et al., 2023)*

<b>a/c</b>	<b>Porosidad %</b>		
	rPET 0%	rPET 25%	rPET 50%
<b>0,40</b>	6	7,7	9,8
<b>0,45</b>	5	8,3	10,5
<b>0,55</b>	6,5	10,2	12,8

## Conclusiones

En el campo de la Ingeniería Civil en Chile, el hormigón corresponde al material de construcción más utilizado en las estructuras del país. Su impacto económico y medioambiental, producto de las demandas de materias primas para su formación, han generado en particular, una sobrexplotación de áridos, erosionando y desertificando las zonas de extracción. Es en motivo de mitigar estos impactos, que el reemplazo parcial de estos áridos tradicionales por rPET en los hormigones, objetivo de factibilidad del presente trabajo, se muestra como una oportunidad de promover una economía circular, un desarrollo sostenible y una reducción de residuos en la industria.

El trabajo de esta tesis se realiza en base al análisis de diversos estudios internacionales de manera de homologarlos a la normativa chilena, estudiando cómo el reemplazo de los áridos por rPET inciden en los parámetros del hormigón tales como su resistencia, permeabilidad, relación agua-cemento, clasificando en agentes internos y externos sus variables.

En primer lugar, se observa que la presencia de rPET en el hormigón incrementa su permeabilidad manteniendo así una relación inversa con la resistencia (ver Ilustración 15, Ilustración 18, Ilustración 21). Estas características parecen derivarse principalmente de la baja interacción entre la matriz de cemento y las partículas de rPET. Como se señaló en el análisis, existe una disparidad entre los métodos empleados para mitigar estos problemas, el térmico y el químico, mostrando a un 10% de reemplazo de árido por rPET una mejora de resistencia del 7% en el caso del químico (ver Tabla 28) y en el caso del térmico una mejora del 11% (ver Tabla 46). Lo que lleva a la conclusión de que el uso del método térmico se presenta como esencial para avanzar en la mejora de los hormigones con rPET.

Asimismo, es pertinente concluir, en base a los análisis realizados, que la relación agua-cemento debe ser examinada directamente. Para el hormigón con rPET, la ganancia de resistencia y la pérdida de permeabilidad se puede observar mediante la porosidad reducida al usar un 0.4 a/c (ver Ilustración 12), sugiriendo la posibilidad de plantear mezclas que requieran plastificantes para garantizar la trabajabilidad (ver Tabla 33).

En cuanto al porcentaje ideal de reemplazo parcial, los estudios respaldan la conclusión de que un 10% de rPET coincide con los niveles óptimos, según los análisis de resistencia realizados por Carreño.

En relación con las normativas, se destaca que, aunque el hormigón con rPET no cumple con los estándares requeridos para grados mayores de exposición, podría ser empleado en grados inferiores de exposición, según lo presentado por Carreño.

Sin embargo, se recomienda no descartar completamente su uso en ciertos hormigones expuestos a agentes externos.

En el ámbito de agentes internos, para la presencia de sulfatos y cloruros, se concluye que en general no se anticipan problemas debido a que los estudios de Ji (2013) que muestra la falta de estos contenidos en el rPET y los varios estudios de reciclajes vistos en la sección PET reciclado muestran que el rPET solo podría aportar una leve cantidad de cloruros debido al 1% de PVC en el proceso de reciclaje, la cantidad resultante según la metodología chilena es mínima y puede pasarse por alto. Respecto a los alcalis, se destaca la necesidad de estudiar el rPET como un posible árido reactivo en caso de considerar su uso.

Con respecto al tamaño a utilizar se concluye que el ideal es solo usar rPET como reemplazo de árido fino, esto debido a que el rPET de tamaño grueso afecta demasiado la resistencia y permeabilidad del hormigón como se ve en la Ilustración 29 donde se puede ver que la pendiente presentada por el rPET grueso presenta una pendiente de 8,5 la cual es superior a los 5,3 del material fino del mismo estudio (Saxena, Gupta, Sharma, Chaudhary, & Jain, 2020) y ambas son muy superiores a los 0,2 de pendiente que muestra el estudio de Sau, mayor pendiente implica un acelerado aumento de la permeabilidad.

Finalmente se debe mencionar la poca información al respecto de durabilidad encontrada, de todas formas, es suficiente para concluir que es factible el uso de rPET como reemplazo parcial de áridos en hormigones estructurales de resistencias hasta 30MPa, esto debido a que si bien se pueden producir hormigones de alta resistencia la necesidad de aditivos plastificadores aumenta el costo y mientras mayor sea la resistencia del hormigón sin rPET más resistencia se pierde con el mismo % de reemplazo. Además se concluye que el reemplazo recomendado se encuentra entre en 5% y un 20%.

De momento, no se recomienda su uso cuando estará expuesto a agentes externos especiales debido a su permeabilidad y falta de cuantificación de como su resistencia como material a ciertos agentes, como los cloruros, lo cual podría derivar en otras formas catalogación para estos hormigones.

En el caso específico de Chile, se observa una limitada exploración de aplicaciones prácticas que contribuyan a una economía circular. La mayoría de los estudios identificados no difieren significativamente de investigaciones previas realizadas en el extranjero. Esta tendencia podría atribuirse a la falta de conocimiento sobre los temas ya abordados en este contexto. De aquí se deriva la importancia de trabajos como el de Carreño y este trabajo, que no solo realizan análisis detallados, sino que también compilan diversos estudios de la misma índole, proporcionando un enfoque más preciso para futuras investigaciones.

La Ley REP en Chile está centrada más en la industria que en la población en general. Este enfoque podría ser el camino necesario para mejorar la relación humana con el medio ambiente. Aunque todos pueden contribuir reciclando, los datos de este estudio indican que la mayor parte del plástico utilizado es de origen industrial y no de uso personal. Este hallazgo puede extrapolarse a muchos otros ámbitos que afectan nuestro entorno ambiental.

Por otro lado, si bien el rPET posee problemas como reemplazo para el árido en el hormigón, siguiendo ciertas pautas establecidas en este trabajo y explorando otras en futuras investigaciones, su viabilidad como material de construcción podría mejorar. Este planteamiento se sustenta, sobre todo, en el excedente proyectado con la Ley REP y en la necesidad de explorar a fondo los beneficios potenciales del rPET en el ámbito de la construcción.

### Posibles investigaciones a futuro

Dentro de los objetivos de este trabajo era entregar futuras investigaciones posibles para encontrar un mejor funcionamiento del rPET dentro de la norma chilena sobre todo enfocándose en la durabilidad.

De esto último hay ciertos ensayos que se deben llevar a cabo debido a que no han sido estudiados, como vimos en el estudio de Saika & de Brito el rPET tratado con calor puede tener una mejora en la resistencia considerable. Por esto se aconseja estudiar mediante la norma NCh2185 la permeabilidad de hormigones con este tratamiento a distintos porcentajes, los porcentajes que aconsejaría estudiar serían 5%, 10%, 15% y 20% más allá es innecesario de momento.

Otro estudio que no fue encontrado es realizar los ensayos de aire en el hormigón con rPET requeridos para hormigones expuestos a ciclos de hielo y deshielo.

Estudiar la reactividad del rPET con el álcali de acuerdo con la norma.

Investigar la variación de resistencia y permeabilidad con distintas relaciones de agua cemento para buscar el ideal considerando los costos de agregar plastificante.

## Bibliografía

- AENOR. (1991). *UNE 85215:1991 - Áridos. Ensayo de reactividad álcali-árido. Método rápido de laboratorio para áridos potencialmente reactivos.*
- AENOR. (1994). *UNE 104-400-94 - Evaluación de la resistencia de los cementos a los sulfatos.*
- AENOR. (1996). *UNE 83316:1996 - Hormigón. Ensayos. Determinación de la resistencia a ciclos de hielo-deshielo.*
- AENOR. (2008). *UNE-EN 12620:2002+A1:2008 - Áridos para hormigón.*
- AENOR. (2009). *UNE 83992-2 - Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Parte 2: Método de ensayo acelerado para determinación de la resistencia a la corrosión de las armaduras provocada por cloruros. Determinación del período de inducción.*
- AENOR. (2009). *UNE EN 12390-8 - Ensayos de hormigón endurecido. Profundidad de penetración de agua bajo presión.*
- AENOR. (2011). *UNE 112011:2011 - Hormigones. Determinación del contenido de cloruros solubles en agua.*
- AENOR. (2016). *UNE-EN 206:2013+A1:2016 - Hormigón. Especificación, rendimiento, .*
- Al-Sabagh, A., Yehia, F., Eshaq, G., Rabie, A., & ElMetwally, A. (2016). *Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate.* Obtenido de Sciencedirect.com: <https://pdf.sciencedirectassets.com/280744/1-s2.0-S1110062116X00025/1-s2.0-S1110062115000148/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEHQaCXVzLWVhc3QtMSJIMEYCIQDwO8tVhzuBfWy0C0f2vF%2Byeu7tA5UNRslY%2BN6uTjmNAIhAJcZlZHnmGJnRHwnwnulWf%2FA3yeXBgsHjmBc%2>
- American Concrete Institute. (2018). *CT-18 ACI Terminology.* Obtenido de studocu.com: <https://www.studocu.com/en-us/document/earlham-college/advanced-costume-construction/aci-concrete-terminology-2018/30957625>

- ANIR. (2021). *Estudio del material disponible país y el reciclado de los productos prioritarios en Chile*. Obtenido de ANIR.cl: [https://www.anir.cl/wp-content/uploads/2022/12/ANIR2021-PET-Estudio\\_del\\_material\\_disponible\\_Pai%CC%81s.pdf](https://www.anir.cl/wp-content/uploads/2022/12/ANIR2021-PET-Estudio_del_material_disponible_Pai%CC%81s.pdf)
- Aocharoen, Y., & Chotickai, P. (2023). Compressive mechanical and durability properties of concrete with polyethylene terephthalate and high-density polyethylene aggregates. *Cleaner Engineering and Technology*.
- ASTM International. (2003). *ASTM C227 - Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)*.
- ASTM International. (2012). *ASTM C1152/C1152M-04(2012) - Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*.
- ASTM International. (2012). *ASTM C1202 - Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*.
- ASTM International. (2015). *ASTM C666 - Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*.
- ASTM International. (2015). *ASTM C876 - Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*.
- ASTM International. (2018). *ASTM C1012 - Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*.
- ASTM International. (2018). *ASTM C33/C33M-18 - Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- Aurea, M., Lima, M. S., Pereira, J., Pereira, P., Barros, R., Coelho, J. F., & Serra, A. C. (2020). Use of recycled polypropylene/poly(ethylene terephthalate) blends to manufacture water pipes: An industrial scale study. *Waste Management*, 250-258.
- Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 1453-1477.
- Bureau of Indian Standards. (2013). *IS 8112: 2013 - Ordinary Portland Cement, 43 Grade – Specification*.
- Bureau of Indian Standards. (2019). *IS 10262:2019 - Concrete Mix Proportioning - Guidelines (Revised)*.
- Carreño, F. (2020). *Análisis Técnico-Económico del uso de PET reciclado*.
- Celik, Y., Shamsuyeva, M., & Endres, H. J. (2021). Thermal and Mechanical Properties of the Recycled and Virgin PET—Part I. *Polymers*.

- Concrete Network. (s.f.). *TIMELINE OF CONCRETE & CEMENT HISTORY*. Obtenido de Concrete Network: <https://www.concretenetwork.com/concrete-history/>
- Indian Standard. (1991). *IS 1489-1 PORTLAND-POZZOLANA CEMENT - SPECIFICATION*. Obtenido de <https://law.resource.org/pub/in/bis/S03/is.1489.1.1991.pdf>
- Instituto nacional de normalizacion. (1979). *NCh163*. Obtenido de <https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh163Of79.pdf>
- Instituto nacional de normalizacion. (2016). *NCh170*. Obtenido de [https://www.academia.edu/37357706/NCH\\_170\\_2016\\_Hormigon\\_Requisitos\\_generales](https://www.academia.edu/37357706/NCH_170_2016_Hormigon_Requisitos_generales)
- Instituto Nacional de Normalizacion. (2021). *NCh148*. Obtenido de [https://www.academia.edu/34880431/I\\_NORMA\\_CHILENA\\_OFICIAL\\_NCh148\\_Of68](https://www.academia.edu/34880431/I_NORMA_CHILENA_OFICIAL_NCh148_Of68)
- Jl, N.-L. (2013). *Study on Preparation Process and Properties of Polyethylene*. Obtenido de scientific.net: <https://www.scientific.net/AMM.312.406>
- Koh, W. H., Le, D. K., Ng, G. N., Zhang, X., Phan-Thien, N., Kureemun, U., & Duong, H. M. (2018). Advanced Recycled Polyethylene Terephthalate Aerogels from Plastic Waste for Acoustic and Thermal Insulation. *Gels*.
- Lee, Z. H., Paul, S. C., Kong, S. Y., Susilawati, S., & Yang, X. (2019). *Modification of Waste Aggregate PET for Improving the Concrete Properties*. Obtenido de <https://www.hindawi.com/>: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/6942052/>
- Marques, D. V., Barcelos, R. L., Silva, H. R., Egert, P., Cremona Parma, G. O., Giroto, E., . . . Magnago, R. F. (2018). Recycled polyethylene terephthalate-based boards for thermal-acoustic insulation. *Journal of Cleaner Production*, 251-262.
- Ministerio del Medio Ambiente. (s.f.). *Economía circular*. Obtenido de <https://economiecircualar.mma.gob.cl/envases-y-embalajes/>
- Ministerio del Medio Ambiente. (s.f.). *Ley Rep 20920*. Obtenido de economía circular: <https://economiecircualar.mma.gob.cl/ley-rep/>
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology* (Second ed.). Pearson.
- Normung, D. I. (1991). *DIN 1048-5: Testing concrete; testing of hardened concrete*

- Nováková, K., Šeps, K., & Achten, H. (2017). Experimental development of a plastic bottle usable as a construction building block created out of polyethylene terephthalate: Testing PET(b)rick 1.0. *Journal of Building Engineering*, 239-247.
- Qaidi, S., Al-Kamaki, Y., Hakeem, I., Dulaimi, A. F., Özkılıç, Y., Sabri, M., & Sergeev, V. (2023). Investigation of the physical-mechanical properties and durability of high-strength concrete with recycled PET as a partial replacement for fine aggregates. *Frontiers in Materials*.
- Rathnayaka, R. M., De Silva, S., & De Silva, S. (2016). Application of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Fibers to produce Fiber Reinforced Concrete pipes. *The Proceedings of the 4th International Symposium on Advances in Civil and Environmental Practices for Sustainable Development (ACEPS-2016)*.
- Recipet. (2022). *Santiago Recicla*. Obtenido de <https://santiagorecicla.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Presentacion-RECIPET.pdf>
- Recipet S.A. (s.f.). *Santiago Recicla*. Obtenido de <https://santiagorecicla.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Presentacion-RECIPET.pdf>
- 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*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813010817>
- Sau, D., Shiuly, A., & Hazra, T. (2023). *Utilization of plastic waste as replacement of natural aggregates*. Obtenido de *Int. J. Environ. Sci. Technol.*: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04946-1>
- Saxena, R., Gupta, T., Sharma, R., Chaudhary, S., & Jain, A. (2020). *Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing PET waste*. Obtenido de [https://scientiairanica.sharif.edu/https://scientiairanica.sharif.edu/article\\_20334\\_92872dff759732e5d9c7790d0a1878ea.pdf](https://scientiairanica.sharif.edu/https://scientiairanica.sharif.edu/article_20334_92872dff759732e5d9c7790d0a1878ea.pdf)
- Sharma, H. (2017). Innovative and Sustainable Application of PET Bottle: A Green Construction Overview. *Indian Journal of Science and Technology*, 1-6.
- 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*, 23-31.

Welle, F. (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview.  
*Resources, Conservation and Recycling*, 865-875.