



**Universidad de Concepción**  
**Dirección de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con**  
**mención en Ingeniería Civil**

**ANÁLISIS DE BENEFICIOS TÉCNICOS Y**  
**AMBIENTALES DE APLICACIONES DE HORMIGÓN**  
**CON MATERIAL RECICLADO DE NFU**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con  
Mención en Ingeniería Civil

POR: EDUARDO JOSABATH GARCÍA BARRERA  
Profesor Guía: Dr. Mauricio Pradena Miquel

Abril, 2022  
Concepción, Chile

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



## RESUMEN

El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizados a nivel mundial, con cerca de 25 billones de toneladas de producción anual, lo que implica un masivo consumo de recursos y emisiones nocivas al ambiente. El cemento, por ejemplo, es responsable del 7% del CO<sub>2</sub> producido a nivel mundial. Para mitigar esto, se investiga la forma de incorporar materias primas alternativas al hormigón. A su vez, el neumático fuera de uso (NFU), el cual es generado a razón de más de 145000 toneladas por año a nivel nacional, es fuente de materiales como el caucho granulado y las fibras de acero, que al ser incorporados al hormigón pueden generar beneficios técnicos relevantes. Las investigaciones se han centrado en estos beneficios sin necesariamente determinar si estos realmente se traducen en beneficios para el ambiente.

La tesis tuvo por objetivo proponer aplicaciones de hormigón con material reciclado de NFU considerando aspectos técnicos y ambientales. Para ello se realizó un exhaustivo análisis de la literatura, trabajo experimental en laboratorio y simulación energitérmica, a fin de poder cuantificar impactos ambientales asociados a distintas aplicaciones a través de un análisis de ciclo de vida (ACV). Las aplicaciones analizadas fueron cuatro: barreras de seguridad, durmientes de ferrocarril, mortero de albañilería y pavimentos.

Como principales resultados se tiene que las cuatro aplicaciones analizadas que incorporan material reciclado de NFU, implican reducción de impactos ambientales que van desde un 4% en el caso del pavimento, hasta un 60% en la barrera de seguridad. Sin embargo, esto no siempre es así, pues en el caso del mortero de albañilería, existen escenarios que debido a requisitos de resistencia se debe agregar una alta cantidad de cemento. Con esto, resulta ser no ambientalmente beneficioso en la categoría Agotamiento de la capa de ozono, con un aumento cercano al 12% respecto al caso base.

## SUMMARY

Concrete is one of the most widely used construction materials in the world, with an annual production of around 25 billion tons, which implies a significant consumption of resources and harmful emissions to the environment. Cement, for example, is responsible for 7% of the CO<sub>2</sub> produced worldwide. To mitigate this, extensive research has been conducted in order to use alternative materials in the fabrication of concrete. Furthermore, end-of-life tires (ELT), which are generated at a rate of more than 145,000 tons per year nationwide, are source of materials such as granulated rubber and steel fibers. Both materials can generate relevant technical benefits when incorporated into concrete. Research has focused on these types of benefits without really recognizing the environmental contribution of this technical solution.

This thesis aimed to propose concrete applications with recycled ELT material considering technical and environmental aspects. For this purpose, an exhaustive analysis of the literature, experimental laboratory work and energy-thermal simulation were carried out in order to quantify the environmental impacts associated with different applications through a life cycle analysis (LCA). Four applications were analyzed: crash barriers, railroad sleepers, masonry mortar and pavements.

The main results show that in all four applications analyzed, rubber addition implies a reduction of the environmental impact, ranging from 4% in the case of pavement to 60% in the case of the crash barriers. However, there are scenarios (for instance, those involving concrete masonry) where a larger amount of cement must be added to the mix due to strength requirements. This results in the technical solution being not environmentally beneficial, as total Ozone depletion increases about 12%.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al proyecto VRID Multidisciplinario 219.091.051-M, “Propuesta de desarrollo sustentable de un compuesto caucho NFU/Hormigón aplicable al escenario constructivo chileno”.

Agradezco al profesor guía de esta investigación, Mauricio Pradena, por su interés, dedicación y apoyo hacia el buen desarrollo de toda la investigación realizada.

Agradezco al laboratorio de Hormigones del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción por permitir la realización de todos los ensayos y mediciones en sus dependencias, especialmente al laboratorista Carlos Bustos, por su gran disposición y ayuda.

Agradezco al laboratorio de Suelos del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción por la disposición y ayuda para poder realizar ensayos en sus dependencias.



**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Motivación .....	1
1.2	Hipótesis .....	2
1.3	Objetivos .....	2
1.4	Metodología .....	2
1.5	Principales Resultados y Conclusiones.....	3
1.6	Organización de la tesis .....	3
CAPÍTULO 2	EVALUACIÓN TÉCNICA-AMBIENTAL DE HORMIGONES	
SUSTENTABLES	.....	4
2.1	Introducción .....	4
2.2	Necesidad de hormigones más sustentables .....	4
2.3	Propuestas para hormigones más sustentables.....	5
2.4	Uso de material reciclado de NFU en hormigones .....	7
2.5	Evaluación de la sostenibilidad de hormigones con material reciclado de NFU.....	13
2.6	Conclusiones .....	14
CAPÍTULO 3	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS.....	15
3.1	Introducción .....	15
3.2	Análisis de ciclo de vida .....	15
3.3	Definición de los casos de estudio .....	19
3.4	Etapas del ACV considerados en cada aplicación .....	25
3.5	Conclusiones .....	28
CAPÍTULO 4	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	29
4.1	Introducción .....	29
4.2	Casos de estudio.....	29
4.3	Conclusiones .....	57
CAPÍTULO 5	CONCLUSIONES .....	59
REFERENCIAS	.....	62
Anexos	.....	78
Anexo 4.1	Resultados de impactos ambientales de cada una de las aplicaciones analizadas ...	78

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Escenarios considerados en el ACV de la barrera de seguridad .....	21
Tabla 3.2 Escenarios considerados en el ACV del durmiente de ferrocarril.....	21
Tabla 3.3 Escenarios considerados en el ACV del mortero para albañilería .....	24
Tabla 3.4 Escenarios considerados en el ACV del pavimento .....	25
Tabla 4.1 Materiales por kilómetro lineal de barrera de seguridad .....	30
Tabla 4.2 Materiales por kilómetro lineal de durmientes instalados .....	35
Tabla 4.3 Materiales utilizados en la vivienda .....	42
Tabla 4.4 Materiales utilizados en la vivienda con mortero de mayor resistencia.....	48
Tabla 4.5 Materiales por kilómetro lineal de pavimento.....	53
Tabla A.4.1 Impactos ambientales de barrera de seguridad por km lineal instalada .....	78
Tabla A.4.2 Variación del ahorro de impactos ambientales de la barrera de seguridad propuesta, en función de la distancia de transporte del material reciclado de NFU.....	78
Tabla A.4.3 Variación del ahorro de impactos ambientales de la barrera de seguridad propuesta, en función de la mejora en la vida útil .....	79
Tabla A.4.4 Impactos ambientales del durmiente de ferrocarril por km lineal instalado.....	79
Tabla A.4.5 Variación del ahorro de impactos ambientales del durmiente de ferrocarril propuesto, en función de la distancia de transporte del material reciclado de NFU .....	80
Tabla A.4.6 Variación del ahorro de impactos ambientales del durmiente de ferrocarril propuesto, en función de la mejora en la vida útil.....	80
Tabla A.4.7 Impactos ambientales de la vivienda analizada considerando el consumo energético para calefacción/enfriamiento .....	81
Tabla A.4.8 Variación del ahorro de impactos ambientales de la vivienda analizada con el mortero propuesto, en función de la distancia de transporte del caucho reciclado de NFU .....	81
Tabla A.4.9 Variación del ahorro de impactos ambientales de la vivienda analizada con el mortero propuesto, en función de la mejora el nivel de ahorro energético .....	82
Tabla A.4.10 Impactos ambientales de la vivienda analizada considerando el consumo energético para calefacción/enfriamiento (mortero de mayor resistencia).....	82
Tabla A.4.11 Variación del ahorro de impactos ambientales de la vivienda analizada con el mortero propuesto, en función de la distancia de transporte del caucho reciclado de NFU (mortero de mayor resistencia) .....	83
Tabla A.4.12 Variación del ahorro de impactos ambientales de la vivienda analizada con el mortero propuesto, en función de la mejora el nivel de ahorro energético (mortero de mayor resistencia) .....	83
Tabla A.4.13 Impactos ambientales del pavimento por km lineal .....	84

Tabla A.4.14 Variación del ahorro de impactos ambientales del pavimento propuesto, en función de la distancia de transporte del material reciclado de NFU .....	84
Tabla A.4.15 Variación del ahorro de impactos ambientales del pavimento propuesto, en función de la disminución del espesor.....	85





**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 3.1 Etapas básicas en un ciclo de vida de un producto. ....	16
Figura 3.2 Descripción de la fase 3 del plan experimental.....	23
Figura 3.3 Etapas del ACV consideradas en el caso de la barrera de seguridad.....	25
Figura 3.4 Etapas del ACV consideradas en el caso del durmiente de ferrocarril.....	26
Figura 3.5 Etapas del ACV consideradas en el caso de la vivienda con mortero de pega y de estuco modificado.....	27
Figura 3.6 Etapas del ACV consideradas en el caso del pavimento.....	27
Figura 4.1 Resultados por categoría de impacto de la barrera de seguridad.....	32
Figura 4.2 Reducción de impactos con la barrera de seguridad propuesta.....	32
Figura 4.3 Reducción de impactos en función de mejora de vida útil de la barrera.....	33
Figura 4.4 Reducción de impactos de la barrera de seguridad propuesta, en función de la distancia de transporte material reciclado.....	34
Figura 4.5 Resultados por categoría de impacto del durmiente de ferrocarril.....	37
Figura 4.6 Reducción de impactos con el durmiente de ferrocarril propuesto.....	37
Figura 4.7 Reducción de impactos en función de mejora de vida útil del durmiente de ferrocarril.....	38
Figura 4.8 Reducción de impactos del durmiente de ferrocarril propuesto, en función de la distancia de transporte material reciclado.....	39
Figura 4.9 Resistencia a la compresión de morteros con adición de caucho en un 5 % de reemplazo, tamaño de grano T1, utilizando cemento C1, con edad de 28 días.....	39
Figura 4.10 Superficie del caucho.....	40
Figura 4.11 Angulo de contacto.....	41
Figura 4.12 Resistencias a la compresión de las muestras.....	41
Figura 4.13 Resistencia a la flexión de las muestras.....	42
Figura 4.14 Configuración espacial de la vivienda.....	43
Figura 4.15 Consumo energético de la vivienda.....	44
Figura 4.16 Resultados por categoría de impacto del mortero propuesto.....	46
Figura 4.17 Reducción de impactos con el uso del mortero propuesto.....	46
Figura 4.18 Reducción de impactos del mortero propuesto, en función de la distancia de transporte material reciclado.....	47
Figura 4.19 Reducción de impactos en función de la reducción en el consumo energético de la vivienda.....	48
Figura 4.20 Resultados por categoría de impacto del mortero con resistencia mayor.....	50

Figura 4.21 Reducción de impactos con el uso del mortero propuesto de mayor resistencia .....	51
Figura 4.22 Reducción de impactos en función de la reducción en el consumo energético de la vivienda .....	52
Figura 4.23 Reducción de impactos del mortero propuesto, con mayor resistencia, en función de la distancia de transporte material reciclado.....	52
Figura 4.24 Resultados por categoría de impacto del pavimento.....	55
Figura 4.25 Reducción de impactos con el uso del pavimento propuesto.....	55
Figura 4.26 Reducción de impactos en función del espesor del pavimento propuesto .....	56
Figura 4.27 Reducción de impactos del pavimento propuesto, en función de la distancia de transporte material reciclado .....	57



## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción debido a su capacidad de desarrollar altas resistencias, ser versátil y relativamente económico. Sin embargo, es responsable de altos impactos ambientales debido a su composición. Por ejemplo, el cemento es responsable del consumo de entre el 12 y 15% del total de la energía industrial y del 7% de las emisiones de CO<sub>2</sub> totales, a nivel mundial. Es por ello que, existe una necesidad de producir hormigones más amigables con el ambiente a través de la incorporación de primas alternativas que resulten en similar o mejor desempeño técnico que los hormigones tradicionales. Uno de ellos es el neumático fuera de uso (NFU), que, al ser reciclado, puede ser utilizado su caucho granulado, y/o sus fibras de acero y textil.

Debido a que la incorporación de caucho granulado y/o fibra de acero reciclada de NFU puede mejorar propiedades de los hormigones, se han investigado distintas aplicaciones de estos, como pavimentos y barreras de seguridad, durmientes de ferrocarril, bloques para pavimentación, y morteros para viviendas. La utilización de caucho granulado y/o fibra de acero reciclada de NFU además contribuye a reducir el problema ambiental de la acumulación de los NFU, que sólo en Chile, alcanza las 145000 toneladas anuales. Sin embargo, las investigaciones de incorporación de material reciclado de NFU en hormigones, se han centrado únicamente en aspectos técnicos, caracterizando mecánicamente las mezclas de estos materiales con distintos planes experimentales y casos de aplicaciones. No así en aspectos ambientales, como sí ocurre en el caso de la incorporación de otros materiales alternativos en hormigones. Debido a esto surge la necesidad de cuantificarlos impactos que este tipo de aplicaciones son capaces de generar, con tal de verificar sus potenciales beneficios ambientales.

De esta manera, el objetivo de esta investigación es proponer aplicaciones de hormigón con material reciclado de NFU, basado en beneficios técnicos y ambientales.

## **1.2 Hipótesis**

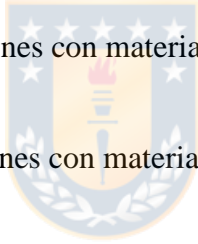
La incorporación de material reciclado de NFU en hormigones disminuye, en ciertas aplicaciones, los impactos ambientales de los hormigones tradicionales.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Analizar beneficios técnicos y ambientales de aplicaciones de hormigón con material reciclado de NFU.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- 
- a) Identificar aplicaciones de hormigones con material reciclado de NFU.
  - b) Caracterizar técnicamente hormigones con material reciclado de NFU.
  - c) Cuantificar los impactos ambientales asociados a cada aplicación de hormigones con material reciclado de NFU, considerando distintas categorías de impacto.

## **1.4 Metodología**

Luego de conocido el estado de avance actual en cuanto al estudio del uso de material reciclado de NFU en hormigones, se procedió a establecer el método de evaluación ambiental a utilizar, considerando el inventario, bases de datos necesarias y categorías de impactos a analizar, para una correcta cuantificación de los impactos ambientales, de acuerdo con la norma ISO 14040 (ISO, 2006). Para gestionar todos estos datos e información se utilizó el programa gestor openLCA, con la ayuda de la herramienta de evaluación de impacto ambiental TRACI 2.1. Con la finalidad de caracterizar correctamente cada una de las aplicaciones, y los escenarios de evaluación asociados, fue necesario un análisis de la literatura, trabajo experimental en laboratorio y simulación

energitérmica. Las aplicaciones investigadas fueron: barreras de seguridad, durmientes de ferrocarril, mortero de albañilería, y pavimentos de hormigón.

### **1.5 Principales Resultados y Conclusiones**

Debido a la incorporación de material reciclado de NFU, las cuatro aplicaciones estudiadas; barreras de seguridad, durmientes de ferrocarril, mortero de albañilería y pavimentos de hormigón, muestran disminuciones considerables de sus impactos ambientales en cada una de las categorías. Esto bajo distintas condiciones iniciales, referentes a mejoras en aspectos técnicos de las mismas y variables relevantes como distancias de transporte de materiales. El porcentaje de reducción de impactos varía desde un 4%, en el caso del pavimento, hasta más de un 60% en el caso de la barrera de seguridad. Sin embargo, en el caso del mortero de albañilería existen algunos escenarios donde debido a modificaciones en su dosificación y/o largas distancias de transporte, este deja de ser ambientalmente beneficioso según categorías de impacto como el agotamiento de la capa de ozono.

Por ello es importante el estudio en conjunto de beneficios técnicos y ambientales en la búsqueda de alternativas para la producción de hormigones más sustentables, puesto que en función de diversas variables una aplicación, distintas a aspectos técnicos, puede resultar ambientalmente no factible.

### **1.6 Organización de la tesis**

El presente documento consta de 5 capítulos. El primero corresponde a un capítulo o introductorio que presenta la motivación, objetivos y metodología de la investigación realizada. El segundo capítulo corresponde a una recopilación bibliográfica de los estudios realizados en el tema de la adición de material reciclado de NFU en hormigones. El tercer capítulo comprende la metodología de la investigación realizada, vale decir, método de evaluación ambiental utilizado, datos de entrada necesarios, y aplicaciones a analizar dentro del estudio. El cuarto capítulo enseña los resultados obtenidos en esta investigación junto con el análisis de éstos. Finalmente, el quinto capítulo entrega las conclusiones de esta investigación.

## **CAPÍTULO 2 EVALUACIÓN TÉCNICA-AMBIENTAL DE HORMIGONES SUSTENTABLES**

### **2.1 Introducción**

Existe una necesidad de tener hormigones que sean más amigables con el ambiente, para lo cual una serie de alternativas han sido estudiadas. Sin embargo, en mayor medida estas investigaciones abordan los aspectos técnicos de las alternativas, no así los ambientales. En particular, la presente investigación se centra en la incorporación de material reciclado de NFU, con el fin de proponer alternativas de hormigones que sean más sustentables, considerando ambos aspectos, técnico y ambiental. Este último, realizando distintos análisis de ciclo de vida (ACV), que permite cuantificar los impactos ambientales de materiales o productos en las distintas etapas de su ciclo de vida (Ilgin y Gupta, 2010).

### **2.2 Necesidad de hormigones más sustentables**

El hormigón es el material más utilizado en la industria de la construcción a nivel mundial con cerca de 25 billones de toneladas de producción anual (Aïtcin, 2000; Crow, 2008; Marinković et al., 2014), debido a que posee la capacidad de desarrollar altas resistencias mecánicas, bajo distintas formas y con un costo relativamente económico (Marinković et al., 2014). A nivel nacional, la situación sigue la misma tendencia, pues más del 80% de las construcciones presentes, han sido fabricadas con hormigón, total o parcialmente (Dávalos, 2013).

Una de las mayores debilidades de este material es su baja ductilidad con baja resistencia a la tracción, además de ser un material frágil (Callister, 1995), por lo que en general se trabaja en conjunto con otros materiales como es el acero de refuerzo o diversos tipos de fibras (Bei-Xing et al., 2004; Falkner y Henke, 1998; Hsie et al., 2008; Schuler y Breit, 2021; entre otros), siendo capaz de soportar grandes solicitaciones.

En general, sus componentes son el cemento, áridos y agua. El cemento, como compuesto principal, es el responsable del consumo de entre el 12 y 15% del total de la energía industrial y

del 7% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>, a nivel mundial (Ali et al., 2011), debido principalmente al clinker y a su proceso de producción (Latawiec et al., 2018). Por otro lado, el uso de áridos comienza a ser un problema de cada vez mayor importancia debido a la existencia finita de este recurso, que dependiendo del lugar de producción existe una alta o baja oferta (Fraj y Idir, 2017; Rakshvir y Barai, 2006). Particularmente en Chile, existen zonas con extracción excesiva de este recurso con efectos muy negativos sobre los lugares de extracción, que en general son ríos. Estos ven modificada su morfología, debido al retiro indiscriminado de material, incluso en zonas claves que por ejemplo pueden afectar la estabilidad de puentes construidos sobre el mismo (CFCN, 2018; CPI, 2020; Federacionjuntas, 2018; Ladiscucion, 2019; entre otros).

Debido a lo anterior, una forma de producir hormigones más sustentables es la incorporación de materias primas alternativas. Sin embargo, para ello es necesario conocer los efectos que estas causan sobre los hormigones tradicionales considerando aspectos técnicos, tal como, mejoras en su durabilidad o resistencia a distintos tipos de solicitaciones, pero también aspectos ambientales, con mejoras bajo distintos indicadores, resultando ser beneficioso (Hooton y Bickley, 2014; Latawiec et al., 2018).

### **2.3 Propuestas para hormigones más sustentables**

En la búsqueda de hormigones más sustentables han surgido diversas alternativas para enfrentar el desafío. Una forma es a través del reemplazo de cemento por otros materiales como, el humo de sílice (Imam et al., 2018; Mehta y Ashish, 2020) y cenizas volantes (Amran et al., 2021; Teixeira et al., 2019). También, se ha estudiado el reemplazo de los áridos fino y/o grueso por otros materiales como áridos reciclados (Liu et al., 2015; Wang et al., 2021), escoria de fundición de cobre (Wang et al., 2021; Brindha y Nagan et al., 2010), vidrio (Abdelli et al., 2021; Mallum et al., 2021), caucho granulado y fibras de acero recicladas de NFU (Alsaif et al., 2018; Liew et al., 2020; Raj et al., 2020; Xie et al., 2015), y así una larga lista de otros materiales menos convencionales que pueden ser agregados al hormigón (Shyamala et al., 2020). Sin embargo, la mayoría de estas se centran en un análisis más bien técnico, caracterizando las propuestas en cuanto a mejoras en distintas propiedades mecánicas. De hecho, comparativamente, el número de investigaciones que incluyen evaluación ambiental de las alternativas (potencialmente) más sustentables, es mucho

menor. Por ejemplo, se ha analizado ambientalmente el uso de cenizas volantes en una aplicación particular como un puente de tránsito vehicular de hormigón. El ACV demostró una reducción de consumo de energía debido al menor uso de clinker, y con ello menores emisiones como los gases de efecto invernadero, con una reducción aproximada de hasta un 12%, cuando el reemplazo es del 50% respecto del cemento (Wang et al., 2017).

Otro caso es la utilización de escoria de fundición de cobre como reemplazo de árido. Gursel y Ostertag (2019) desarrollaron un ACV en aplicaciones de hormigones de alta resistencia con reemplazo de este material por el árido fino. Los resultados muestran que los impactos ambientales de estos hormigones disminuyen con el aumento de la tasa de reemplazo, con reducciones en distintas categorías de impacto como, Calentamiento global hasta un 30% y en Acidificación un 41%, cuando el reemplazo es del 100%. Sin embargo, cuando estos resultados son normalizados respecto a la resistencia a la compresión, los mayores beneficios se obtienen con un reemplazo de hasta un 50%.

Por otro lado, el uso de áridos reciclados también ha sido estudiado ambientalmente a través de un ACV. Una investigación desarrollada por Estanqueiro et al., (2018), considera tres escenarios: el primero implica el uso de áridos naturales para la fabricación de hormigón, El segundo implica el uso de áridos reciclados utilizando una planta fija de reciclaje y el ultimo escenario considera el uso de áridos reciclados y que la planta de reciclaje sea móvil. En general, la utilización de áridos reciclados utilizando la planta de reciclaje fija o móvil, representa beneficios ambientales, debido a que se considera por un lado un menor uso de áridos naturales y el uso de material que inicialmente sería depositado en un vertedero. El porcentaje de reducción de impactos ambientales pueden llegar a ser de un 23% en la categoría de impacto Calentamiento global, respecto a hormigones con áridos naturales. Sin embargo, existen ciertos casos donde no necesariamente existen beneficios ambientales por el uso de este tipo de materiales. Por ejemplo, al comparar los dos escenarios que utilizan áridos reciclados, respecto al primero, existe una distancia crítica, que es la que existe entre la cantera y planta de hormigón, que por defecto inicialmente era de 28km. Considerando la categoría de impacto Calentamiento global, deja de ser beneficioso el segundo y tercer escenario, cuando esta distancia es mayor a 67 km y 96 km, respectivamente. Queda en evidencia entonces, que un factor determinante al momento de evaluar su sostenibilidad es la



distancia desde donde se traslada el material, estableciéndose una distancia crítica que depende de cada escenario y que, en caso de ser sobrepasada, los beneficios ambientales de utilizar este material reciclado se contrarrestan. (Zhang et al., 2019).

Otro ejemplo es el estudio realizado por Llona (2022) donde evalúa ambientalmente distintos escenarios, utilizando vidrio molido como reemplazo parcial de cemento o árido fino en hormigones. En este caso, cuando se reemplaza hasta un 20% de árido fino por vidrio molido, no existe una reducción de impactos ambientales, más bien sucede que por la necesidad de transporte del vidrio molido, resulta ser no beneficioso en distintas categorías, con aumento de los impactos ambientales de respecto al caso base como Acidificación, Eutroficación, Calentamiento global y Efectos respiratorios en la salud humana, cercanos a 9%, 3%, 4%, 4%, respectivamente. En cambio, cuando el reemplazo es por cemento, los resultados son completamente distintos. Esto debido a que, al bajar la dosis de cemento, se ahorran una serie de emisiones al ambiente debido a que este material es el mayor responsable frente a los demás componentes del hormigón, compensando el aumento las distancias de transporte debido a la incorporación del vidrio. En este caso, en todas las categorías analizadas se observan menores impactos ambientales, destacando las categorías Ecotoxicidad, Eutroficación, Calentamiento global y Agotamiento de la capa de ozono, con reducciones cercanos al 10% en cada una de ellas, con un porcentaje de reemplazo del 10%.

Con esto, queda en evidencia la importancia de incluir análisis ambientales en investigaciones sobre hormigones con incorporación de materias primas alternativas. Sin embargo, el número de investigaciones es reducido, aun cuando el ACV es fundamental para definir la sostenibilidad real de estos hormigones (Frontera et al., 2020).

## **2.4 Uso de material reciclado de NFU en hormigones**

### **2.4.1 Problemática de los neumáticos fuera de uso**

Un NFU es el que por su estado y en relación con las normas de seguridad vigentes, no es apto para su uso primario sin aplicarle técnicas que extiendan su vida útil. Existen una serie de problemas asociados a la disposición inadecuada de estos residuos, que se ha convertido en un problema

medioambiental y social causante de incendios de difícil extinción y acumulación de ratas, larvas e insectos (Kashani et al., 2018).

En Chile, en 2019 se generaron aproximadamente 145000 toneladas de NFU (CINC, 2020), de los cuales solo un 17% se recicla (Gobierno Regional de Arica y Parinacota, 2018). Actualmente si bien es un negocio emergente, pocas empresas se dedican a reciclaje de este material, entregando al mercado subproductos con cierto valor comercial, pero que no tienen un uso masivo que represente una solución real para su acumulación. Para dar solución a este problema, el estado se ha pronunciado a través de la publicación de Ley N°20920 que define al NFU como un residuo prioritario, es decir, debe ser dispuesto de una manera particular, siendo esto responsabilidad de los productores (MMA, 2016).

El NFU, para ser reciclado, se separa en general en tres materiales distintos. El primero de ellos es el caucho que puede ser presentado granulado o en polvo. Los otros dos materiales de desecho son, la fibra de acero y las fibras textiles, que son parte de la estructura el neumático (Aparicio et al., 2018).

#### **2.4.2 Propiedades y aplicaciones de material reciclado de NFU en hormigones**

Desde la década de los 90 se ha estudiado el comportamiento de hormigón con adición de material reciclado de NFU en distintas formas y tamaños, utilizando distintos tipos de cemento. Esto con la finalidad de dar uso un material de desecho, pero también de otorgar mejores propiedades mecánicas a la mezcla de hormigón (Eldin y Senouci, 1993).

El caucho granulado al ser agregado al hormigón es capaz de mejorar su tenacidad (Liu et al., 2013; Assaggaf et al., 2021), resistencia al impacto (Atahan et al., 2012; Hameed et al., 2016), disminuir su permeabilidad de iones de cloruro (Ou y Zhu, 2006), mejorar su impermeabilidad (Gesoglu et al., 2014), además de mayor resistencia a los ciclos hielo deshielo (Pham et al., 2019), mayor durabilidad (Liu et al, 2016) y mejorar su absorción acústica y térmica (Guo et al., 2019; Assaggaf et al., 2021). Sin embargo, existen algunos desafíos relacionados a la interacción que existe entre el caucho granulado y la matriz cementicia, la que es débil, debido a la naturaleza hidrofóbica del caucho, lo que se traduce en una disminución de otras propiedades como son la resistencia a la

compresión y flexión (Assaggaf et al., 2021). Sin embargo, este problema se ha abordado, utilizando distintos tratamientos de la superficie del caucho granulado, antes de ser añadido a la mezcla de hormigón (García et al., 2021), además de la adición de otras fibras. Por ejemplo, cuando se agrega fibra de acero reciclada de NFU a la mezcla en conjunto con el caucho granulado, se observan mejores resultados en propiedades como, la resistencia residual, absorción de energía y resistencia a los ciclos de carga (Alsaif et al., 2018; Liew et al., 2020; Raj et al., 2020; Xie et al., 2015).

Algunas aplicaciones destacadas que han sido estudiadas son, por ejemplo, bloques de hormigón como elementos de pavimentación ya sea de vehículos o peatones. Al agregarse caucho, se observa una mejora en la resistencia a la abrasión, flexibilidad y tenacidad. (Chaikaew et al, 2019; Jamshidi et al., 2019; Moeniela, 2006). Otra aplicación similar a la anterior, son las baldosas de tránsito exclusivamente peatonal donde el efecto es similar al añadirle caucho al hormigón (da Silva et al., 2015; Etefa et al., 2020).

Por otro lado, se han investigado los durmientes de ferrocarril. Estos son los elementos estructurales situados en dirección transversal al eje de la vía, sobre los cuales se sitúan los rieles y constituyen mediante la sujeción, el punto de unión entre el riel y el balasto. Los durmientes de hormigón son ampliamente utilizados debido a sus ventajas en cuanto a costo, vida útil y mantenimiento, frente a otras alternativas como durmientes de madera o acero. La vida útil de estos se considera cercana a los 50 años (Parvez y Foster, 2017). Sin embargo, la durabilidad del hormigón podría verse afectada negativamente por agrietamiento, que puede ser causado fácilmente por cargas de impacto, contracción y exposición ambiental perjudicial (Huang et al., 2020) De hecho, de los 400 millones de durmientes de hormigón en el mundo, aproximadamente entre 2% y 5% requieren reemplazo cada año debido a falla prematura (Palomo et al., 2011).

Durante inspecciones de terreno, muchas organizaciones ferroviarias han observado grietas en las traviesas de hormigón. Se identificó como la causa principal una carga de rueda poco frecuente, de gran magnitud y corta duración (Ferdous et al., 2014; Remennikov y Kaewunruen, 2008). Con todo, las pautas de diseño existentes para una traviesa de hormigón pretensado se basan únicamente en condiciones de carga estáticas y cuasi estáticas y no tienen en cuenta las cargas de impacto de

gran magnitud. Así, actualmente se estudia el desarrollo de nuevos materiales para soportar cargas de impacto que economizan las operaciones ferroviarias al reducir los costos de mantenimiento (Raj et al., 2020).

En este sentido, se ha estudiado el mejoramiento de las propiedades dinámicas de este elemento a través de la adición de caucho reciclado de NFU con distintos tamaños, concluyendo que estos cumplen los requisitos de resistencia y que aumentan su durabilidad, resistencia al impacto, control del agrietamiento y capacidad de amortiguamiento, aspectos fundamentales en los durmientes, debido a las solicitaciones a las que son sometidos durante su vida útil (Meesit et al., 2017 y Kaewunruen et al., 2018). Esta última mejora, respecto a su capacidad de amortiguamiento, trae consigo reducciones de las acciones dinámicas máximas ya sea flexión, corte y/o tracción (Meesit et al., 2017). Raj et al. (2020) determinaron que es posible añadir un 15% de caucho granulado con un 0.75% de fibras de acero, manteniendo el rendimiento de los durmientes frente a cargas estáticas y de flexión, y mejorando drásticamente su resistencia llegando a ser un 122% más que los durmientes de referencia

Por otro lado, la resistencia a fatiga de este elemento ha sido estudiada con la adición de fibra de acero manufacturadas. En este caso las mejoras son significativas en cuanto a la capacidad frente a los ciclos de carga y resistencia residual. En los durmientes, con una dosis de 40kg/m<sup>3</sup>, se observó una mayor capacidad estática y al menos un 220% más, de resistencia a la fatiga respecto a los durmientes de referencia (Parvez y Foster, 2017).

En cuanto a obras viales, también se ha estudiado algunas aplicaciones. La barrera de seguridad de hormigón es uno de los atenuadores de impacto más utilizados en carreteras, con la finalidad de desacelerar vehículos hasta una parada segura hasta su detención o redirigirlos lejos de un objeto fijo (AASHTO, 2011). Es un elemento que posee una vida útil aproximada de 50 años, con una baja necesidad de intervenciones, implicando bajos costos de mantención y menores impactos sobre los usuarios que barreras confeccionadas con otros materiales (Albuquerque et al., 2011; Karim et al., 2011 y William, 2007).

A pesar de esto, el hormigón como material posee propiedades no deseables en elementos como este. Por ejemplo, su baja capacidad de deformación cuando es impactado (Atahan et al, 2012). De acuerdo con lo estudiado por Atahan et al. (2012), anteriores investigaciones sugieren al hormigón con adición de caucho reciclado de NFU como un material capaz de absorber energía, debido a su mayor plasticidad y ductilidad lo que se complementa con la disminución de su índice de fragilidad, que disminuye a medida que aumenta la cantidad de caucho añadida. Esto permitiría desacelerar los vehículos en una distancia mayor, lo que implica menores fuerzas implicadas en el impacto y con ello menores daños tanto en los vehículos como en sus ocupantes, lo que resulta clave en elementos de seguridad como esta barrera. Dentro del estudio se consideró la confección de probetas de hormigón con adición de caucho reciclado de NFU, lo que permitió un aumento de hasta un 160% de energía disipada en comparación a las muestras de control, cuando el caucho reemplazado era del 100%. Sin embargo, propiedades como la resistencia a la compresión disminuyeron drásticamente. Cuando el porcentaje de reemplazo era entre 20% y 40%, en volumen, se redujeron significativamente la gravedad del impacto, pero manteniendo una resistencia a la rotura aceptable.

Por otro lado, el uso de hormigones reforzados con fibras de acero tiene características de resistencia comparables al hormigón tradicional (Carroll et al., 2016) y, además, estas fibras pueden ser recicladas de NFU y utilizadas en hormigones con reemplazo de caucho del mismo origen, con resultados incluso mejores a los hormigones tradicionales (Wang et al., 2019). En laboratorio, Raj et al. (2020), encontraron que la capacidad de absorción de energía de barreras con caucho NFU y fibras de acero o fue 224% más que la energía absorbida por barreras de hormigón tradicional. En el análisis numérico este mejoramiento fue de un 163%, respecto a las barreras tradicionales (Raj et al., 2020). Lo anterior permite durmientes con mayor vida útil y que a su vez posibilitaría una reducción del consumo de árido fino en más de 48 toneladas, reutilizando más de 13 toneladas de caucho reciclado de NFU por cada kilómetro de barrera. En este caso, y debido a los estudios anteriormente mencionados (Carroll et al., 2016 y Wang et al, 2019) es posible utilizar las fibras de acero recicladas de los NFU dejando de necesitar su manufactura, lo que permitiría tener impactos ambientales y costos aun menores.

Otra aplicación asociada al sector vial, son los pavimentos de hormigón, que son ampliamente utilizados como solución vial debido a su alta durabilidad y capacidad de resistir altos tráficos y climas extremos (de Solminihac et al., 2003; Hassouna y Jung, 2020). En la actualidad se ha estudiado la optimización de la geometría de las losas de hormigón tanto en sus dimensiones en planta, como su espesor, con la finalidad de mejorar la interacción entre esta y las cargas recibidas, necesitando una menor cantidad de material, y con ello mano de obra y energía necesaria para su producción (Covarrubias y Pablo, 2012; Hassouna y Jung, 2020; Roesler et al., 2012; entre otros). Para hacer posible esto, se ha optado por el uso de fibras, como son las de acero manufacturadas (Lau et al., 2020; Mohammadi y Kaushik, 2005; Sorelli et al., 2006) y polipropileno (Ramakrishnan et al., 1989; Shen, She y Gao, 2012), que son ampliamente utilizadas en las llamadas losas cortas o con geometría optimizada, que poseen espesores bajos y longitudes cortas. Sin embargo, estas fibras implican impactos ambientales y costos monetarios altos. Así, opciones a fibras manufacturadas son las recicladas, como las fibras de acero y caucho granulado reciclados de NFU, con mejoras en propiedades como la flexibilidad y ductilidad de las losas de hormigón, respecto a las tradicionales (Alsaif et al. 2019; Awolusi et al., 2021; Centonze, Leone y Aiello, 2012; Soleimani et al., 2021; Suleman et al., 2021). Por otro lado, propiedades dinámicas como la respuesta a cargas cíclicas, se ven mejoradas, debido a esta mejora en la flexibilidad de la mezcla, minimizando por ejemplo espesores de las grietas, y una mejor respuesta frente a grandes movimientos y asentamientos de la subrasante (Alsaif et al. 2019).

En cuanto a la reducción de espesores de pavimentos, se ha estudiado que es posible un 5% considerando el uso simultaneo de caucho granulado y fibra de acero reciclada de NFU, debido a las mejoras que estos entregan a los pavimentos en cuanto a la resistencia a ciclos de carga (Alsaif et al. 2019). También se ha estudiado la adición solo de fibra de acero reciclada de NFU con efectos similares, pero numéricamente mayores, llegando a ser posible disminución de espesores de hasta un 26% (Alsaif et al. 2019; Graeff et al., 2012).

Otro sector donde se han estudiado aplicaciones es el residencial, asociado a viviendas y edificaciones en general en elementos no estructurales. La albañilería es un método de construcción ampliamente utilizado en viviendas tanto unifamiliares o conjuntos habitacionales en Chile, debido a su facilidad y rapidez de ejecución (Bachmann, 2007). Sin embargo, esta solución por sí sola, no

cumple con aspectos importantes para elementos de la envolvente de una vivienda, cómo es la resistencia térmica. Habitualmente esto es solucionado mediante la adición de capas aislantes interiores o exteriores de forma tal de mejorar esta propiedad, alcanzando niveles mínimos de aislación térmica (Guevara, 2015).

Una forma distinta de dar solución a este problema es mejorar las propiedades térmicas de los elementos que componen la albañilería, como son los ladrillos, el mortero de pega y/o el mortero de estuco. De acuerdo con la literatura, la conductividad térmica del hormigón, en general, disminuye significativamente con el aumento del contenido de caucho granulado reciclado de NFU, debido a la baja conductividad térmica del caucho y el aire atrapado asociado a su adicción (Assaggaf et al., 2021).

Es posible utilizar caucho en altos porcentajes de reemplazo, asumiendo disminuciones de propiedades como la resistencia a la compresión y flexión, en aplicaciones no estructurales, como mamposterías, donde la mezcla muestra un comportamiento hidrofóbico, con una baja absorción y una aislación térmica alta, sin la adición de procesos complejos a los habituales (Petrella et al., 2019). Se ha comprobado que, en particular, cuando el contenido de caucho es inferior al 30%, el rendimiento de aislación térmica aumenta a un ritmo elevado a medida que se aumenta el contenido de caucho (Bustamante et al., 2008).

## **2.5 Evaluación de la sostenibilidad de hormigones con material reciclado de NFU**

A pesar de que existe una gran extensión de estudios técnicos realizados, que evalúan diversas aplicaciones asociadas a la adición de material reciclado de NFU, no sucede igual desde un punto de vista ambiental. No fue posible encontrar estudios que contengan un análisis de ciclo de vida (ACV), con este material en particular, como si sucede en casos similares con la utilización de otros materiales o alternativas (Estanqueiro et al., 2018; Gursel y Ostertag, 2019; Pešta et al., 2020; entre otros). Además, existen casos donde en función de los requerimientos de la aplicación, se ha considerado, por ejemplo, modificar su dosificación con el fin de disminuir efectos de pérdidas de algunas propiedades como la resistencia a la compresión y/o flexión, aumentando la cantidad de cemento (Asutkar et al., 2017; Youssf et al., 2020), material que es responsable en gran parte de

los impactos ambientales negativos del hormigón, lo que refuerza la necesidad de incorporar un análisis ambiental, además de la caracterización técnica.

## 2.6 Conclusiones

Existe una gran necesidad a nivel mundial de tener hormigones que sean más amigables con el medio ambiente y para ello se han estudiado un gran número de alternativas frente a los tradicionales. Una de estas alternativas es la incorporación de material de NFU considerando que este también es un material de desecho que representa un importante problema ambiental. Sin embargo, las distintas investigaciones encontradas, se han centrado solo en su caracterización técnica, lo que demuestra la necesidad de evaluar las mismas desde un punto de vista ambiental, permitiendo establecer de manera definitiva si estas son realmente sustentables.





## **CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS**

### **3.1 Introducción**

De acuerdo con el capítulo anterior, queda en evidencia la necesidad de evaluar ambientalmente distintas aplicaciones y escenarios de hormigones que contengan material reciclado de NFU, considerando aspectos técnicos basados en investigaciones anteriores y/o trabajo en laboratorio. Así, fue necesario establecer una metodología de investigación que sea capaz de cumplir con el objetivo de esta investigación.

### **3.2 Análisis de ciclo de vida**

Un análisis de ciclo de vida (ACV) es un método utilizado para evaluar el impacto ambiental de un material o producto a lo largo de las distintas etapas de su vida (Ilgin y Gupta, 2010). Existen diferentes tipos de ACV, pero en general pueden ser divididos en dos. El primero es el clásico, el cual se centra en la metodología propiamente tal, con cálculos detallados de cada una de las etapas del ciclo de vida para cada una de las alternativas bajo análisis. El segundo tipo de análisis llamado Streamlined Life Cycle Assessment (SLCA), se centra en la comparación de dos alternativas con ciertas diferencias (Vogtländer, 2012). Este último enfoque, más aplicado, es muy adecuado para el análisis de propuestas potencialmente más sustentables que las tradicionales.

#### **3.2.1 Objetivo y alcance**

El objetivo de este análisis es la comparación de los impactos ambientales de distintas propuestas de mejora para elementos de hormigón, a los que se le incorpora material reciclado de NFU, ya sea caucho y/o fibra de acero. El tipo de análisis utilizado es el SLCA. debido a que optimiza el uso de recursos, enfocándose según sea el caso, en las etapas del ciclo de vida de un producto, donde existe una diferencia significativa en cuanto al uso de recursos o emisiones debido a las modificaciones en el diseño de las propuestas frente a su caso base (Vogtländer, 2012).

La Figura 3.1 presenta el ciclo de vida de un material o producto.

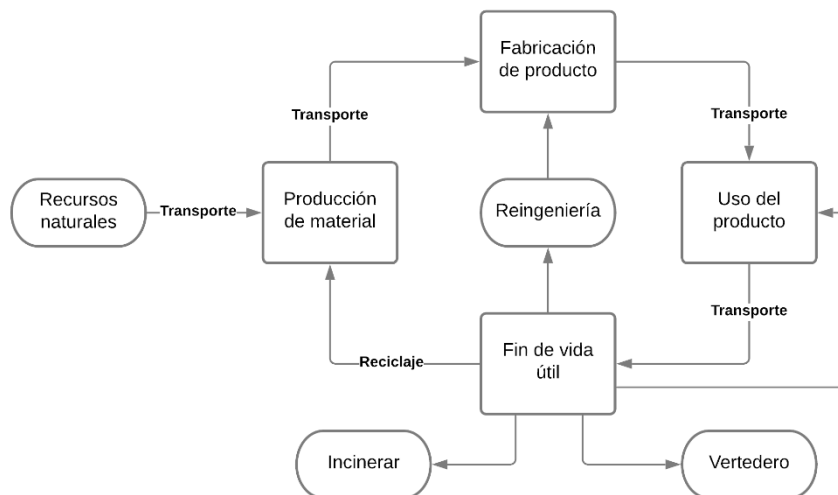


Figura 3.1 Etapas básicas en un ciclo de vida de un producto (adaptado de Ashby (2020)).

Es visible que sería necesaria una gran cantidad de datos e información para poder cuantificar de manera correcta los impactos ambientales potenciales del mismo en todas las etapas del ciclo de vida (Ashby, 2015). Es por ello que, al realizar un Streamlined LCA, nos concentramos en las etapas donde existan diferencias, lo que no significa necesariamente que exista menor precisión, sino que simplemente se excluyen los subsistemas o etapas que se consideran iguales en las alternativas comparadas (Vogtländer, 2012)

### 3.2.2 Programa gestor para análisis de ciclo de vida

Para la realización del análisis, se utilizó el programa gestor Open LCA, en su última versión disponible, 1.10.3 desarrollado por GreenDelta (2021). Esto debido a que además de ser de libre acceso, ha sido ampliamente utilizado en ACV enfocados en la comparación de alternativas, asociados a distintos tipos de materiales, incluido hormigones (Garces et al., 2021; Imtiaz et al., 2021; Pamu et al., 2021; Rezaei, Bulle y Lesage, 2019; entre otros).

A partir de los resultados, el programa gestor genera un análisis de impacto ambiental según el método escogido, que en este caso es la herramienta Tool for Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts (TRACI), desarrollada por Environmental Protection Agency de Estados Unidos. Para los casos analizados la herramienta TRACI cuantifica el impacto

ambiental potencial de los procesos considerados, utilizando categorías de impacto equivalentes comunes, como por ejemplo Calentamiento global en kg de CO<sub>2</sub> equivalente (Bare et al., 2003). En el ACV se consideraron las siguientes categorías de impacto que utiliza la herramienta TRACI: agotamiento de la capa de ozono (Ozone depletion), calentamiento global (Global warming), acidificación (Acidification), eutrofización (Eutrophication), smog (Smog), efectos respiratorios en la salud humana (Respiratory effects), efectos cancerígenos y no cancerígenos en la salud humana (Carcinogenics and Non carcinogenics) y ecotoxicidad (Ecotoxicity) (Bare, 2014).

### 3.2.3 Análisis de inventario

El análisis de inventario es un balance de materia y energía de un sistema, que implica la recopilación de datos y la realización de cálculos a fin de cuantificar las entradas y salidas. Las entradas corresponden a la materia prima y fuentes de energía utilizadas y las salidas son las emisiones al aire, agua y suelo, además del producto final. Para ello se define en cada caso una unidad funcional, como base sobre la cual se efectuarán los balances de materia y energía, permitiendo una correcta comparación. Este proceso se encuentra estandarizado en la norma ISO 14040 (ISO, 2006).

Esta investigación, que considera reemplazos parciales de materiales tradicionales del hormigón por otros reciclados, se necesita la cuantificación de los materiales utilizados, el consumo de energía en la producción, y las distancias de transporte tanto de materiales como del producto final en cada caso.

Existe una base de datos ambientales chilena pero la información allí disponible solo considera de las cargas de energía involucradas en el desarrollo de un material, emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de un material y la energía asociada a la fase de transporte de cada material de forma parametrizada (ÁBACO, 2018). Esto quiere decir que las entradas y salidas de esta base ya están introducidas dentro de ciertas categorías, no teniéndose el detalle en cuanto a las emisiones totales tanto al aire, suelo y agua. Por otro lado, existen datos como los asociados al cálculo de consumo eléctrico, que están basados en una base de datos internacional, como es la Ecoinvent 3.0, que no es de origen local. Es más, investigaciones chilenas han realizado distintos análisis asociados a la

cuantificación de impactos ambientales de materiales de construcción producidos en el país, concluyendo que, se subestiman significativamente sus impactos ambientales, al ser comparados con bases de datos utilizadas a nivel internacional (Bunster, 2020; Sanguinetti y Ortiz, 2014). De esta manera, la base de dato utilizada para la mayoría de las materias primas y energía en esta investigación fue la European Reference Life Cycle Database (ELCD 3.2) desarrollado por el Joint Research Center del año 2015, cuyos datos han sido proporcionados o aprobados por la industria (Cebrián et al., 2009). Debido a la falta de algunos datos, como la información ambiental de los distintos aditivos utilizados y el proceso de confección de hormigón, se complementó con información disponible en la investigación desarrollada por Sjunnesson (2005), cuyos datos ambientales de los aditivos los obtuvo de la Environmental Declaration Superplasticizing Admixtures (EFCA) (2002) y los referidos a la confección de hormigones, en la investigación realizada por Rydh et al. (2003) e informes ambientales de las fábricas de Malmö y Sjöbo, Suecia. Cabe destacar que la base de dato ELCD 3.2 cumple con los requisitos de compilación y validez de datos exigidos por la norma europea EN 15804 (2012).

Complementando lo anterior, es útil realizar este tipo de análisis ambientales utilizando datos existentes que esperar al desarrollo de tales datos de forma local. De hecho, los resultados pueden ser útiles también para mostrar la necesidad de generación de datos locales, contribuyendo con ello, a que la industria local pueda proporcionar esos datos de forma similar a lo ocurrido en países europeos (Oyarzo y Peuportier, 2014).

En cada uno de los casos se estimó la cantidad de materiales necesarios, en las unidades convenientes en cada caso, además de distancias de transporte. Los materiales tradicionales de fácil acceso, como el cemento, áridos, aditivos y barras de acero, se consideraron disponibles a una distancia de 25 km y para los materiales reciclados que son el caucho y fibra de acero provenientes de los NFU se consideró una distancia mayor, igual a 250 km, en cada uno de los casos. En cuanto a los materiales reciclados utilizados, no se considera su carga ambiental pues no hay un traspaso de la carga ecológica del producto antiguo al nuevo (SIM, 2020). Además, en el caso particular de Chile, la ley 20920 responsabiliza a los productores de productos prioritarios como el NFU de organizar y financiar la recolección de los residuos de sus productos, así como de su

almacenamiento, transporte y tratamiento, entendiéndose este último como cualquier operación física previa a su valorización o eliminación (MMA, 2016).

### **3.2.4 Análisis de sensibilidad**

Debido a que en las distintas propuestas hay una serie de variables que contienen algún grado de incertidumbre, es necesario analizar el comportamiento de los resultados frente a variaciones de los datos utilizados como entrada (Saltelli, 2002).

En primer lugar, se consideró la distancia de transporte de los materiales reciclados, debido a que se ha evidenciado que en este tipo de análisis puede ser un factor determinante al momento de concluir si una aplicación es o no beneficiosa ambientalmente (Araneda, 2021; Estanqueiro et al., 2018; Lloná, 2022). En cada una de las aplicaciones se analizó dos escenarios distintos a la inicial. Uno de ellos con una distancia menor, de 25 km y otro con una distancia mayor, igual a 500 km. El segundo factor tomado en cuenta se centra en las mejoras consideradas en la comparación del caso tradicional con la propuesta de mejora en cada aplicación. Por ejemplo, la vida útil de un producto, materiales necesarios para su producción, o mejoras indirectas dentro de un sistema mayor como podría ser el nivel de aislación térmica que es capaz de otorgar el uso de NFU en morteros. Esto debido a que los aspectos técnicos de cada aplicación analizada se basan en la literatura, con programas experimentales reducidos, que, al llevarse a un contexto local, podrían tener algunas variaciones. Justamente para determinar el impacto de estas variaciones se realizan análisis de sensibilidad. En cada aplicación se analizó al menos un escenario con una mayor y menor mejora a la establecida en el escenario inicial. Esta depende de cada caso y se detalla en la siguiente sección.

### **3.3 Definición de los casos de estudio**

De las aplicaciones mostradas en el capítulo anterior se analizaron cuatro, considerando los que disponían más información técnica respecto a características o propiedades necesarias para una correcta comparación ambiental con estudios suficientes respecto a los efectos de la adición de material reciclado de NFU. Además, estas aplicaciones debían mostrar los mejores resultados desde

el punto de vista técnico, suficientemente justificados, de acuerdo con el estado de investigación actual.

Es sabido que el caucho de NFU reduce la resistencia a la compresión y flexión de los hormigones (Shu y Huang, 2014; Karakurt, 2015; Liu et al., 2016; entre otros). Sin embargo, la adición de fibras metálicas tiende a contrarrestar este efecto. Corresponden a este caso, tres de las cuatro aplicaciones analizadas en esta investigación. Sin embargo, también se analiza el caso de mortero de albañilería al cual solo se agrega caucho reciclado de NFU, lo que reduce las resistencias de los morteros. Es por esto, que esta última aplicación requiere un estudio experimental especial que se detalla en la sección 3.3.3.

A continuación, se detallan datos de entrada, procesos y escenarios necesarios para la realización de ACV en cada una de las aplicaciones.

### 3.3.1 Barrera de seguridad

Desde el punto de vista de la sustentabilidad, es posible comparar una barrera tradicional de hormigón con una que contiene adición de caucho reciclado de NFU reforzada con fibras de acero. Esto permitiría tener una vida útil mayor a 2.6 veces al caso tradicional debido a su mayor resistencia al impacto (Raj et al., 2020). Esto implica que en el ciclo de vida de este elemento para cumplir con el mismo lapso en una barrera en servicio sería necesario fabricar 1.6 barreras tradicionales extras, es decir, más materiales (cemento, áridos, acero, agua), transporte y energía involucrada en el proceso de producción. Lo anterior considerando un 15% de reemplazo de caucho por árido fino, respecto al volumen, e incorporando un 0.75% de fibra de acero, provenientes de NFU, respecto al volumen total de la mezcla. Los detalles de los escenarios analizados en este caso se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Escenarios considerados en el ACV de la barrera de seguridad

VARIABLES ANALIZADAS	DETALLE
Escenario Base	Mejora de la vida útil: 160%.
	Distancia transporte de material reciclado de NFU: 250 km
Análisis de sensibilidad respecto a mejora de la vida útil	Escenario 1: 50%
	Escenario 2: 100%
	Escenario 3: 220%
Análisis de sensibilidad respecto a la distancia de transporte de material reciclado de NFU	Escenario 1: 25 km
	Escenario 2: 500 km

### 3.3.2 Durmiente de ferrocarril

De acuerdo con lo analizado en el capítulo anterior con la incorporación de caucho y fibra de acero reciclada de NFU, es posible una mejora de la vida útil del 100% respecto a un durmiente de hormigón tradicional, usando como base técnica para ello el estudio realizado por Raj et al. (2020). Así, en el ciclo de vida de este elemento, para cumplir con el mismo período de un durmiente en servicio, sería necesario fabricar al menos un durmiente tradicional extra, con lo que esto implica. Esto es, más materiales (cemento, áridos, acero, agua), transporte y energía involucrada en el proceso de producción. Se considera un 15% de reemplazo de caucho por árido fino, respecto al volumen, e incorporando un 0.75% de fibra de acero, provenientes de NFU, respecto al volumen total de la mezcla. Los detalles de los escenarios analizados en este caso se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Escenarios considerados en el ACV del durmiente de ferrocarril

VARIABLES ANALIZADAS	DETALLE
Escenario Base	Mejora de la vida útil: 100%.
	Distancia transporte de material reciclado de NFU: 250 km
Análisis de sensibilidad respecto a mejora de la vida útil	Escenario 1: 50%
	Escenario 2: 220%
Análisis de sensibilidad respecto a la distancia de transporte de material reciclado de NFU	Escenario 1: 25 km
	Escenario 2: 500 km

### 3.3.3 Mortero de pega y estuco de albañilería

Para analizar las mejoras en el nivel de consumo energético para calefacción y enfriamiento que provocaría el uso de caucho en una vivienda, se consideró la utilización de caucho granulado tanto en el mortero de pega como de estuco interior y exterior en una vivienda de 48 m<sup>2</sup>, en distintas zonas de Chile. Este caso se basa en un conjunto de estudios (Assaggaf et al., 2021; Bustamante et al., 2008 y Petrella et al., 2019), que consideran que al realizar un reemplazo del árido fino por 20% de caucho en peso, es posible alcanzar una disminución del nivel de aislación térmica del 50%.

Como la adición de caucho NFU reduce la resistencia a la compresión de morteros y hormigones (Shu y Huang, 2014; Karakurt, 2015; Liu et al., 2016; entre otros), fue necesario desarrollar un plan experimental específico para determinar un tratamiento costo-efectivo que permitiera mitigar esta reducción de resistencia. El plan experimental consistió en tres fases con un total de 318 probetas de mortero RILEM con adición de caucho granulado de NFU. Para ello se realizó una serie de combinaciones de casos, que contemplaron distintas variables. Estas son: el tipo de cemento utilizado (C1: Bio Bio Especial y C2: Polpaico Especial), el tratamiento superficial del caucho (R1: Hidratación, R2: Oxidación + Sulfonación y R3: Peróxido de hidrogeno), el tamaño del grano de caucho (T1: 2.36 - 4.75 mm, T2: 1.18 - 2.36 mm y T3: 0.30 - 1.18 mm) y los distintos porcentajes de reemplazo respecto al peso del árido (0%, 2.5%, 5%, 7.5% 12.5%). Así se determinó en estado fresco, la docilidad de las muestras y luego en estado endurecido, su densidad, resistencia a flexión y compresión. Estas dos últimas propiedades a distintas edades de ensayo: 7, 14 y 28 días.

La Figura 3.2 presenta la fase 3 y final con 12 probetas. Esta es una fase de optimización con los mejores resultados obtenidos en las fases anteriores donde se comparan los tres tratamientos superficiales (R1, R2 y R3), utilizando el primer tipo de cemento (C1), caucho en el tamaño T1, en un porcentaje de reemplazo del 5%. Esto considerando, muestras con incorporación de caucho sin tratamiento (R0).



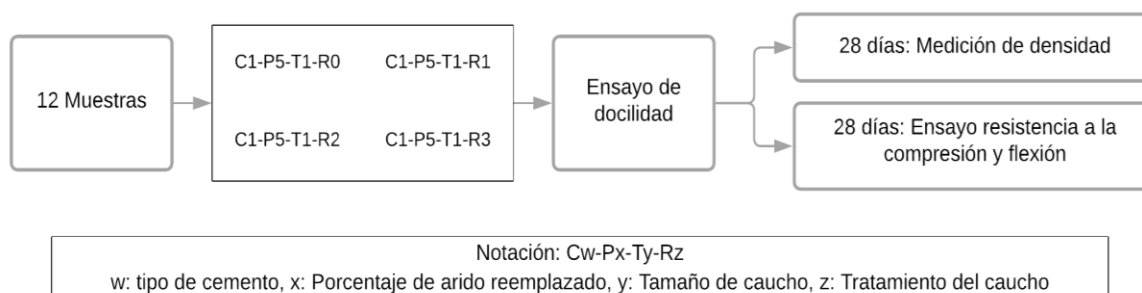


Figura 3.2 Descripción de la fase 3 del plan experimental (García et al., 2021).

Para una determinación integral del tratamiento más adecuado que permita mitigar la reducción de resistencia, se incluyeron también análisis SEM y de ángulo de contacto con los tres tratamientos investigados.

Lo anterior se realizó primeramente para niveles de resistencias de aplicaciones comunes de morteros y hormigones. Luego, con el mejor tratamiento obtenido, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y flexión asociados a la aplicación de morteros de albañilería. En este caso, se necesita cumplir con los requisitos establecidos en la normativa nacional NCh 2123 (INN, 2003) que fija un mínimo de resistencia a la compresión de  $50 \text{ kg/cm}^2$  para el mortero, que en este caso se considera como de pega y estuco. Los rangos de porcentajes de reemplazo utilizados fueron 0%, 5%, 10%, 20%, 30% y 40%, de acuerdo con las investigaciones de Assaggaf et al., 2021; Bustamante et al., 2008 y Petrella et al., 2019. El cemento utilizado fue Bio Bio, la dosificación se basó en el manual del mortero (Zabaleta y Egaña, 1989), y los ensayos de resistencia a la compresión y flexión bajo la norma NCh158 (INN, 1967).

Puesto que este caso en particular se basa en la mejora del nivel de aislación térmica de la vivienda, específicamente en muros, fue necesario simular dinámicamente el caso. Para ello se utilizaron los programas OpenStudio, Energy Plus y Sketchup, que han sido aplicados a casos similares donde ha sido necesario evaluar el comportamiento térmico de viviendas (Castro et al., 2020; Hernández et al., 2019; Rodríguez-Miranda et al., 2021). Este análisis se realizó en cuatro comunas de Chile: Arica, Santiago, Concepción y Punta Arenas, para conocer el nivel de consumo energético de viviendas de iguales características en zonas del país con características climáticas diferentes. Los detalles de los escenarios analizados en este caso se presentan en la Tabla 3.3. Los escenarios

desarrollados en el análisis de sensibilidad se realizaron en función del porcentaje de reducción energético provocado en la vivienda a partir de la mejora en la aislación de esta.

Además del caso con morteros para la albañilería, con una resistencia a la compresión de  $50 \text{ kg/cm}^2$ , se analizó un caso adicional donde la resistencia a la compresión necesaria es de  $100 \text{ kg/cm}^2$ . Esto, con la finalidad de conocer el efecto causado en los impactos ambientales de este tipo de morteros, con requisitos de resistencia mayor. En términos prácticos, todos los demás factores no se vieron modificados, excepto la dosificación de materiales.

Tabla 3.3 Escenarios considerados en el ACV del mortero para albañilería

VARIABLES ANALIZADAS	DETALLE
Escenario Base	Mejora del nivel de aislación térmica en el mortero: 50%.
	Distancia transporte de material reciclado de NFU: 250 km
Análisis de sensibilidad respecto a mejora en el consumo energético en la vivienda	Escenario 1: 50% menor al resultado del escenario base
	Escenario 2: 100% más que el resultado del escenario base
Análisis de sensibilidad respecto a la distancia de transporte de material reciclado de NFU	Escenario 1: 25 km
	Escenario 2: 500 km

### 3.3.4 Pavimentos

Para el análisis de sostenibilidad y de acuerdo con lo presentado en el capítulo anterior, se asumió una disminución del 5% en el espesor del pavimento, utilizando como base técnica el estudio realizado por Alsaif et al. (2019). Esto con un 30% en volumen de reemplazo de caucho por árido fino de la mezcla, e incorporando una dosis de  $40 \text{ kg/m}^3$  de fibra de acero, provenientes de NFU.

Tabla 3.4 Escenarios considerados en el ACV del pavimento

VARIABLES ANALIZADAS	DETALLE
Escenario Base	Disminución del espesor del pavimento: 5%.
	Distancia transporte de material reciclado de NFU: 250 km
Análisis de sensibilidad respecto a la disminución del espesor del pavimento	Escenario 1: 2.5%
	Escenario 2: 10%
	Escenario 3: 26%
Análisis de sensibilidad respecto a la distancia de transporte de material reciclado de NFU	Escenario 1: 25 km
	Escenario 2: 500 km

### 3.4 Etapas del ACV considerados en cada aplicación

Para cada una de las aplicaciones es necesario establecer las etapas específicas consideradas en el ACV, es decir las etapas donde se presentan diferencias significativas con la opción de hormigón tradicional.

En el caso de la barrera de seguridad, las etapas donde existen diferencias significativas debido a la incorporación de material reciclado de NFU son: producción de material, fabricación y periodo de uso de esta, contemplando además cada uno de los procesos de transporte necesarios como se presentan en la Figura 3.3. Esto debido a que el principal factor considerado a modificar es la vida útil de la barrera, además de la dosificación de sus materiales componentes, que implican cambios en la cantidad de transporte involucrado y proceso de producción.

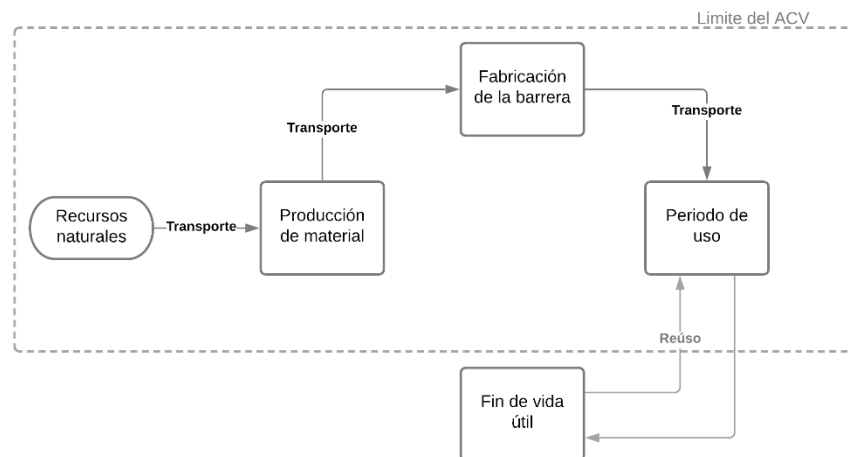


Figura 3.3 Etapas del ACV consideradas en el caso de la barrera de seguridad

Para el durmiente de ferrocarril las etapas son similares al caso anterior, debido a que al incorporar material reciclado de NFU, cambia la vida útil del durmiente de ferrocarril además de su dosificación de materiales. Con ello, la cantidad transporte y proceso de producción también se ven alterados. Estas etapas, se presentan en la Figura 3.4.

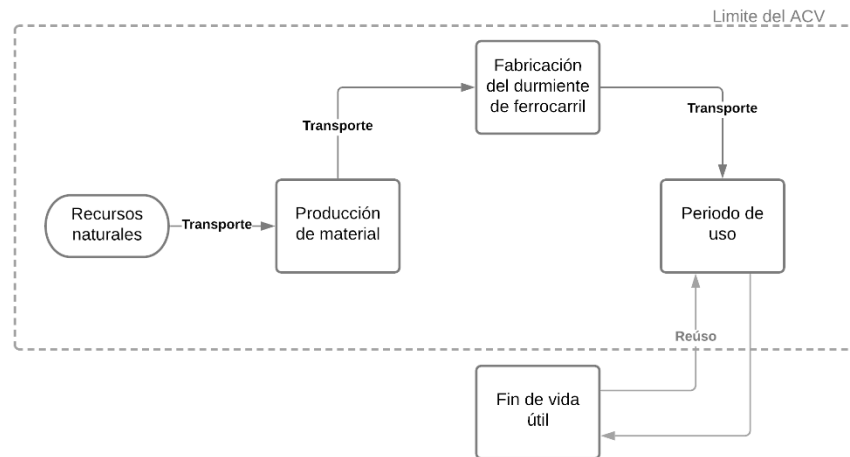


Figura 3.4 Etapas del ACV consideradas en el caso del durmiente de ferrocarril

Para la vivienda que contiene mortero con adición de NFU, las etapas incluidas son la producción de materiales, proceso de confección de la albañilería y periodo de uso de la vivienda, con los efectos térmicos que tiene el cambio en los muros de esta, además de los procesos de transporte involucrados. Estas etapas se muestran en la Figura 3.5. Esto se debe a que al incorporar caucho reciclado de NFU al mortero, se modifica la dosificación de materiales y con ello el transporte involucrado y proceso de producción. Además, cambian los niveles de aislación térmica de los muros de la envolvente, con una reducción en el consumo energético necesario para mantener mismo nivel de confort térmico, sin verse afectada su vida útil.

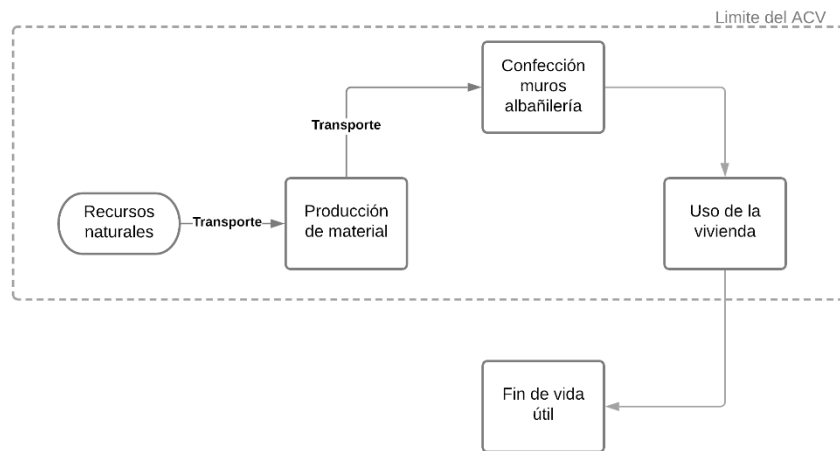


Figura 3.5 Etapas del ACV consideradas en el caso de la vivienda con mortero de pega y de estuco modificado

Para la última aplicación analizada, la única modificación considerada es la disminución del espesor de la losa. Con esto, la cantidad de materiales utilizados es menor y, por ende, el transporte y proceso de producción también, con una vida útil de la losa que se mantiene igual que el caso base. De esta manera, se contempla la fase de producción de materiales, y confección de los pavimentos, con los procesos de transporte involucrados, tal como se muestra en la Figura 3.6.

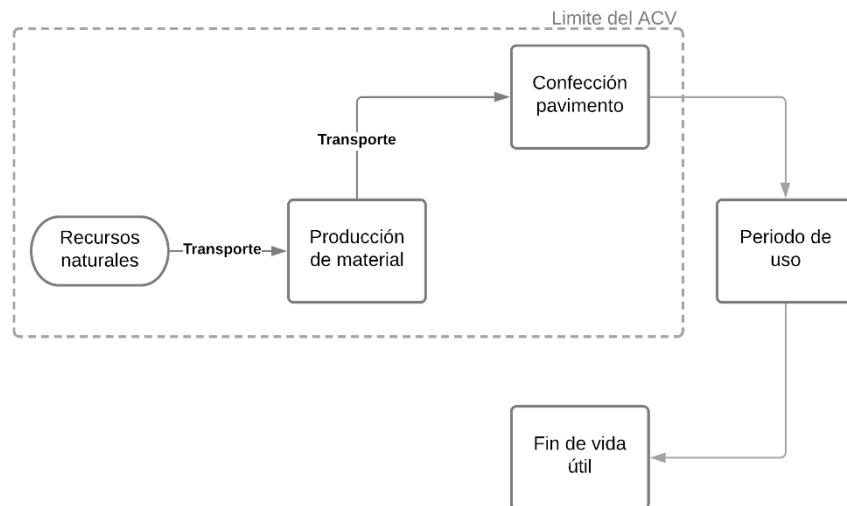


Figura 3.6 Etapas del ACV consideradas en el caso del pavimento

### 3.5 Conclusiones

En este capítulo quedo definida la forma en que se realizó esta investigación, presentándose cuál fue el método utilizado de ACV, utilizando un programa gestor validado y una base de datos construida a partir de distintas fuentes, debidamente respaldadas por distintas investigaciones e instituciones. Para la correcta cuantificación de los escenarios de evaluación asociados a las aplicaciones, fue además necesario complementar lo anterior con ensayos experimentales en laboratorio y la realización de simulación energitérmica.



## **CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **4.1 Introducción**

Se presentan los resultados de cada uno de los casos de estudio analizados en esta investigación, incluyendo inventario, plan experimental, simulación energit mica e impactos ambientales. La cuantificación de estos impactos ambientales, en distintas categorías, se realizó de acuerdo con lo establecido en el capítulo anterior. Además, se dan a conocer los resultados del análisis de sensibilidad realizado en cada una de las aplicaciones.

### **4.2 Casos de estudio**

#### **4.2.1 Barrera de seguridad**

##### a) Inventario

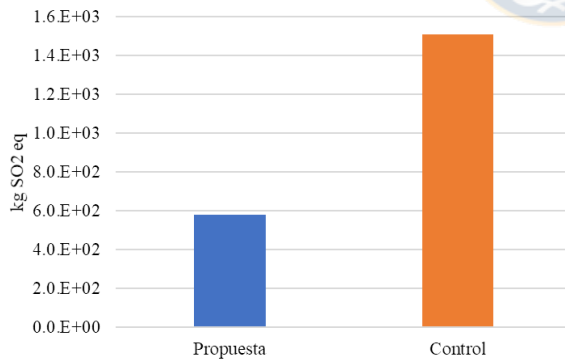
Del análisis de inventario realizado, en base a la dosificación utilizada por Raj et al. (2020), se tiene la cantidad de material utilizado por kilómetro lineal de barrera de seguridad, en la Tabla 4.1. Esto para el caso control y la propuesta, que posee caucho granulado y fibra de acero reciclada de NFU. En el ACV, consideró una longitud de barreras de seguridad de 1 km. Como es necesario trasladar la barrera desde una planta de producción hasta el lugar donde será utilizado, se considera un transporte de 50 km.

Tabla 4.1 Materiales por kilómetro lineal de barrera de seguridad

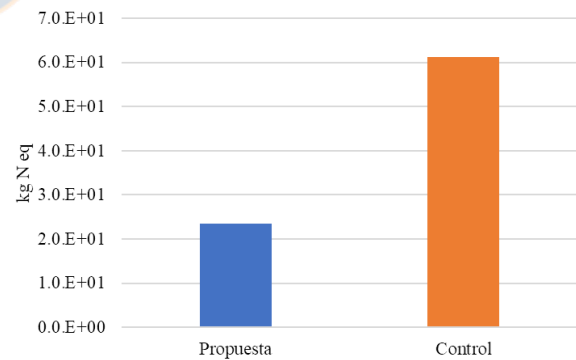
Material [ton]	Caso	
	Control	Propuesta
Cemento	175.9	174.6
Árido fino	326.8	282.0
Árido grueso	390.8	387.9
Agua	70.4	69.8
Aditivo superplastificante	1.1	1.1
Caucho	0.0	12.1
Fibra de acero	0.0	23.1
Barras acero	32.1	32.1

b) Resultados del ACV

Los resultados en cada una de las categorías analizadas, tanto para el caso control y el caso propuesto, que posee caucho y fibra de acero reciclado de NFU, se muestran en la Figura 4.1. Como se puede observar, en cada una de las categorías de impacto, la barrera de seguridad propuesta genera menores impactos ambientales que el caso control.

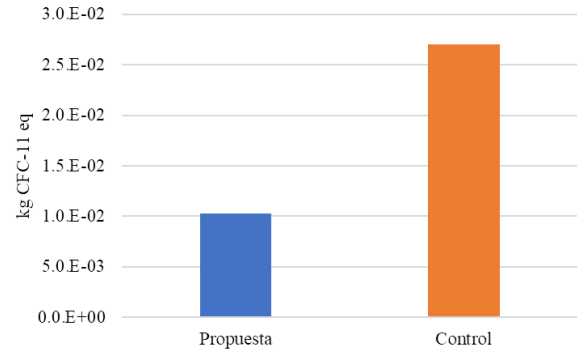
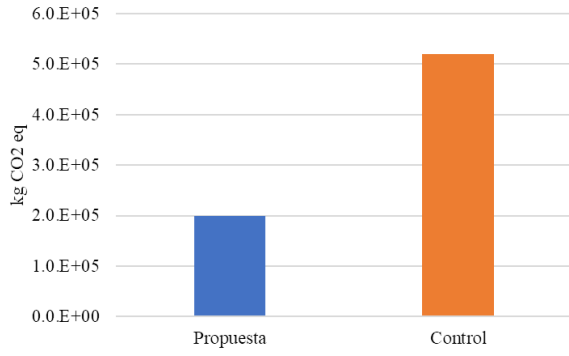


a) Acidificación



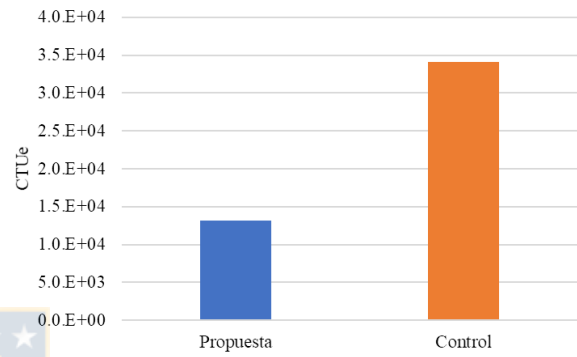
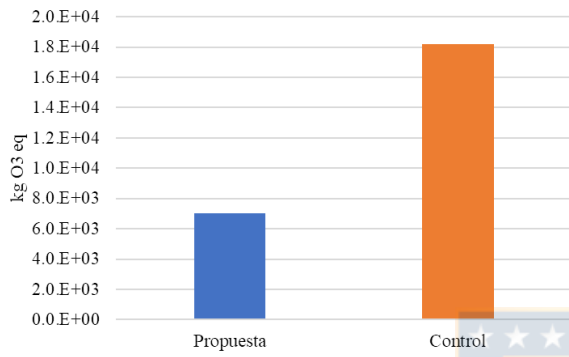
b) Eutroficación





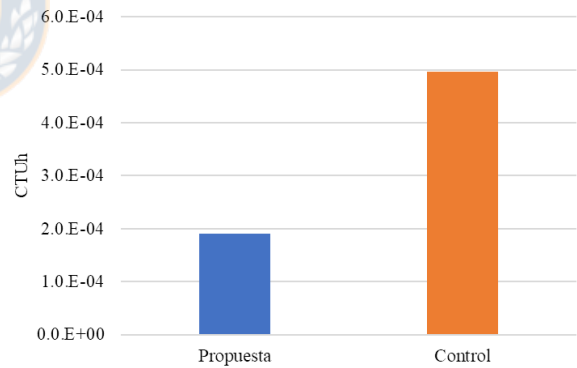
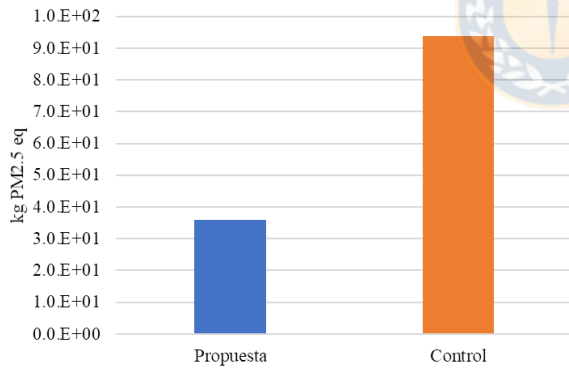
c) Calentamiento Global

d) Agotamiento de la capa de ozono



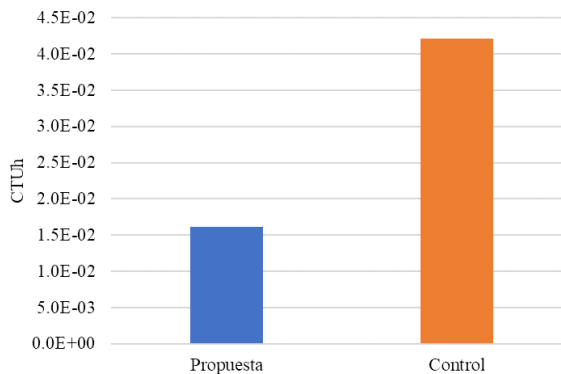
e) Esmog

f) Ecotoxicidad



g) Efectos respiratorios

h) Efectos cancerígenos



i) Efectos no cancerígenos

Figura 4.1 Resultados por categoría de impacto de la barrera de seguridad

La Figura 4.2 presenta la reducción porcentual de impactos ambientales que significa la utilización de la barrera propuesta frente a una tradicional. La reducción está sobre el 60% en cada una de las categorías de impacto, lo que refleja que la barrera de seguridad propuesta es capaz de contribuir a una construcción más sustentable.



Figura 4.2 Reducción de impactos con la barrera de seguridad propuesta

Estos menores impactos ambientales están relacionados directamente con la mayor resistencia al impacto que poseen las barreras de seguridad propuestas, la cual proviene de la adición conjunta del caucho granulado y de la fibra de acero reciclada de NFU, que implica una mayor vida útil de las barreras, 2.6 veces la de una tradicional. A la vez, una reducción del consumo de materiales tradicionales, como son el cemento, áridos, agua y acero.

c) Análisis de sensibilidad

En primer lugar, se analizó el comportamiento de la reducción de impactos en cada una de las categorías, en función de la mejora en vida útil de la barrera. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 4.3.

Se evidencia que, la reducción de impactos es altamente dependiente de la mejora en la vida útil de la barrera y tiene una relación directa, es decir, a medida que aumenta la mejora de la vida útil de la barrera, es mayor la reducción de impactos ambientales del ciclo de vida de esta. Por otro lado, se verifica que, si la mejora de vida útil de la barrera disminuyera a solo un 50% respecto a una tradicional, implicaría de igual forma una reducción de impactos por sobre un 30%, en cada una de las categorías.

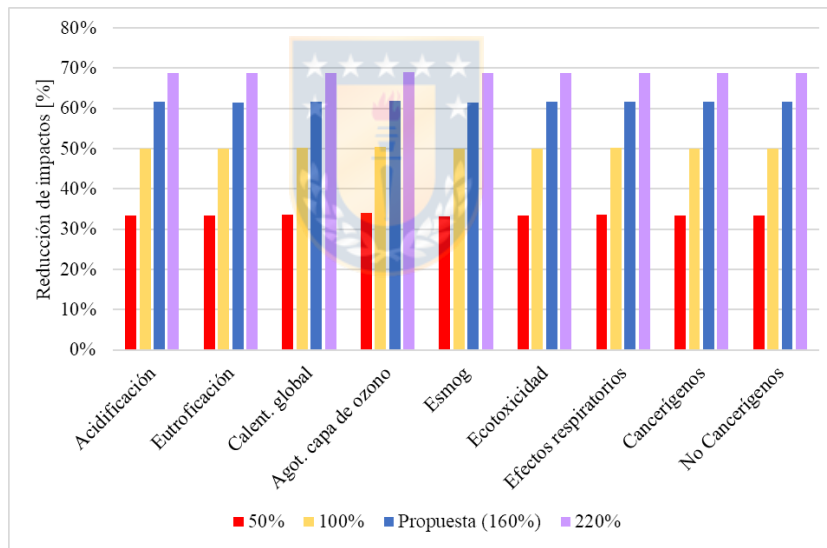


Figura 4.3 Reducción de impactos en función de mejora de vida útil de la barrera

La segunda variable analizada es el transporte de los materiales reciclados de NFU, hasta la planta de producción. Como se muestra en la Figura 4.4, existe una relación inversa entre la distancia de transporte y reducción de impactos, es decir, a medida que aumenta la distancia de transporte, es menor la reducción de los impactos ambientales de la barrera, en cada una de las categorías. Sin embargo, estas variaciones son leves, menores al 1% en cada categoría. Esto se asocia a que, la

reducción de impactos es muy dependiente de la mejora en la vida útil de la barrera, dejando a las otras variables como el transporte del material reciclado, con una menor relevancia en el ACV.

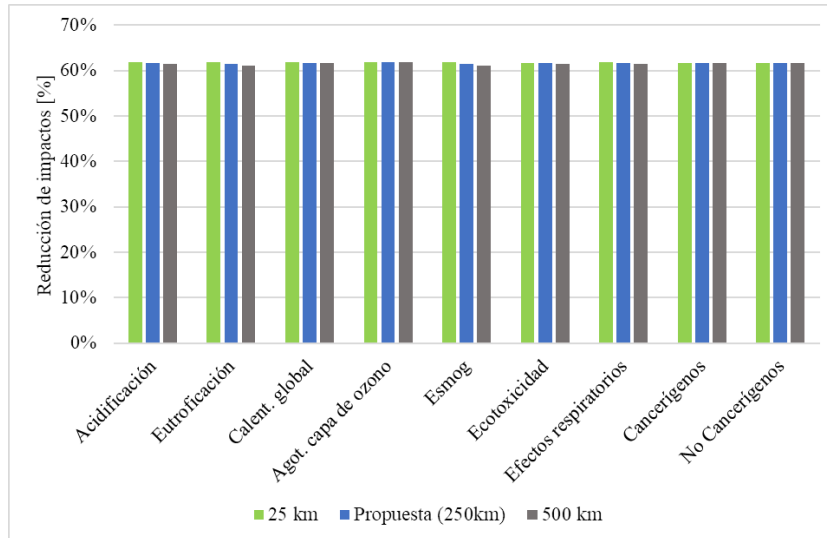


Figura 4.4 Reducción de impactos de la barrera de seguridad propuesta, en función de la distancia de transporte material reciclado

### 4.2.2 Durmiente de ferrocarril

#### a) Inventario

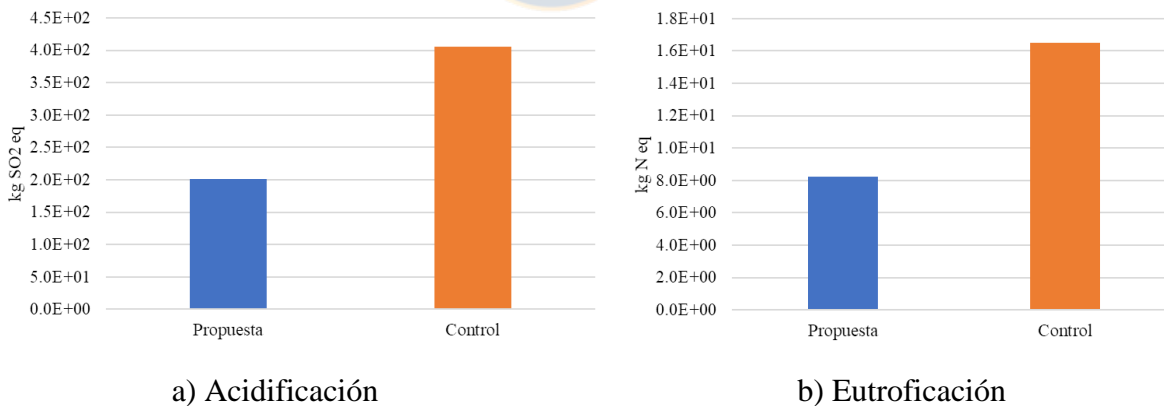
Del análisis de inventario realizado, y en base a la dosificación utilizada por (Raj et al., 2020), se tiene que la cantidad de material por kilómetro lineal de durmiente de ferrocarril es la que se muestra en la Tabla 4.2. Esto, para el caso control y para la propuesta, que posee material reciclado de NFU. Como es necesario trasladar el durmiente desde una planta de producción hasta el lugar donde sería utilizado, se considera un transporte de 150 km.

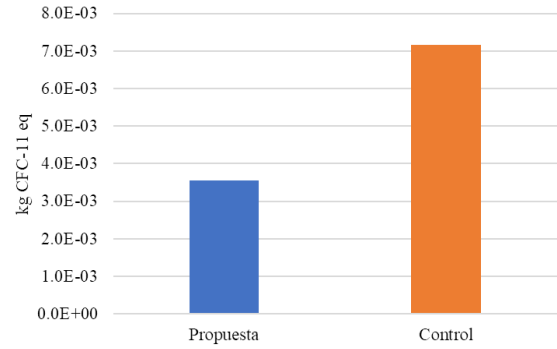
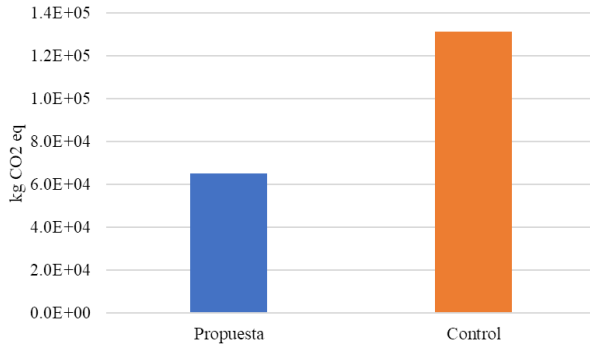
Tabla 4.2 Materiales por kilómetro lineal de durmientes instalados

Material [ton]	Caso	
	Control	Propuesta
Cemento	60.3	59.7
Agua	20.2	20.1
Grava	149.1	148.5
Arena	83.8	69.7
Acero	6.3	6.3
Reductor de agua	0.6	0.6
Modificador de viscosidad	0.2	0.2
Caucho granulado	0.0	3.0
Fibra de acero	0.0	7.4

b) Resultados del ACV

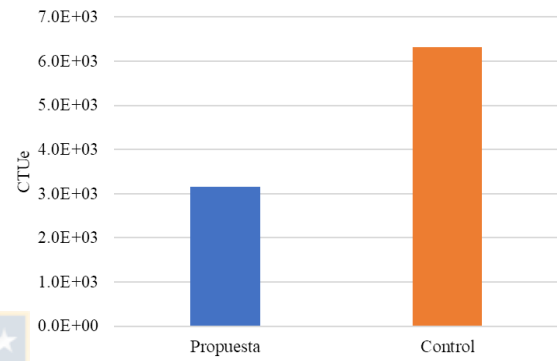
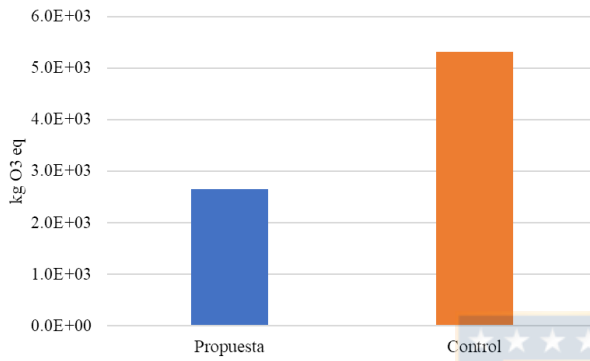
Los resultados en cada una de las categorías analizadas, tanto para el caso control y el propuesto, que posee caucho y fibra de acero reciclado de NFU, se muestran en la Figura 4.5. En cada una de las categorías de impacto, el durmiente de ferrocarril propuesto genera menores impactos ambientales que el caso control.





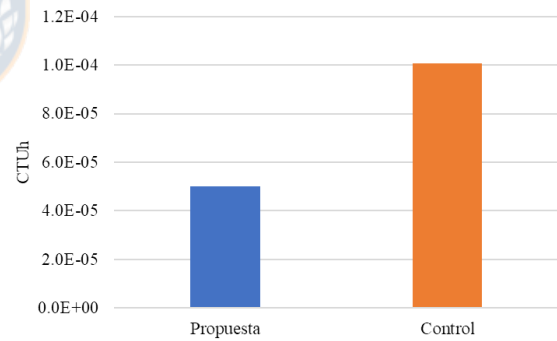
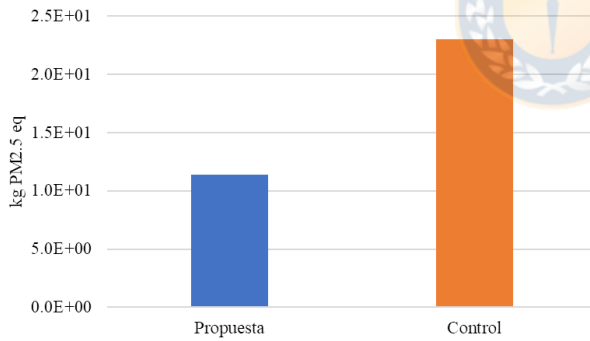
c) Calentamiento Global

d) Agotamiento de la capa de ozono



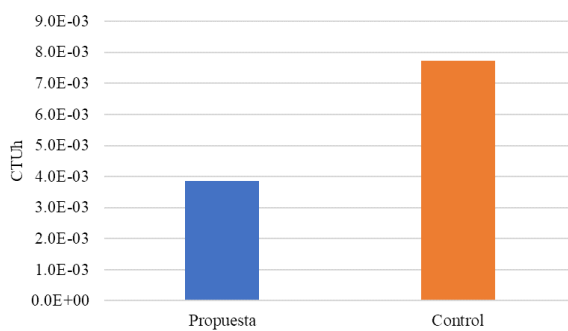
e) Esmog

f) Ecotoxicidad



g) Efectos respiratorios

h) Efectos cancerígenos



i) Efectos no cancerígenos

Figura 4.5 Resultados por categoría de impacto del durmiente de ferrocarril

La Figura 4.6 presenta la reducción porcentual de impactos ambientales que implica la utilización del durmiente de ferrocarril propuesto, frente al tradicional. Como es posible observar, la reducción de impactos está por sobre el 50% en cada una de las categorías, lo que refleja que el durmiente propuesto sería capaz de contribuir a una construcción más sustentable.

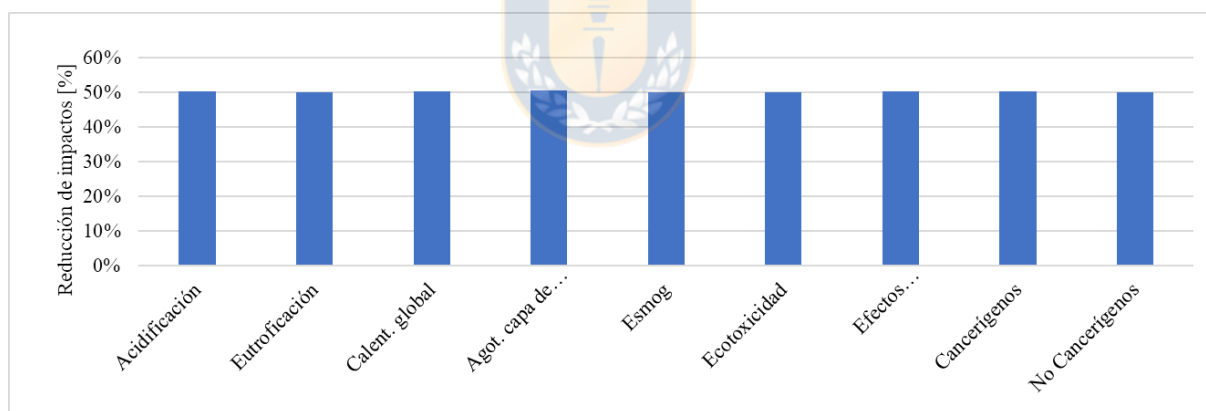


Figura 4.6 Reducción de impactos con el durmiente de ferrocarril propuesto

Las ventajas del durmiente propuesto están relacionadas con su mayor resistencia al impacto y a la fatiga, debido a ciclos de carga. Esto a raíz de la adición, tanto del caucho granulado como de la fibra de acero reciclada de NFU, que significa una mayor vida útil de los durmientes, en un 100%, que a su vez implica una reducción de materiales necesarios para la confección para su producción como son el cemento, áridos, agua y acero.

c) Análisis de sensibilidad

En primer lugar, se analizó el comportamiento de la reducción de impactos en cada una de las categorías en función de la mejora en la vida útil del durmiente. Los resultados de este se presentan en la Figura 4.7. En este caso, el porcentaje de reducción de impactos es altamente dependiente de este valor y tiene una relación directa. Así, con una mejora de vida útil de la barrera de solo un 50% respecto a una tradicional, seguiría implicando una reducción de impactos por sobre un 30%, en cada una de las categorías.

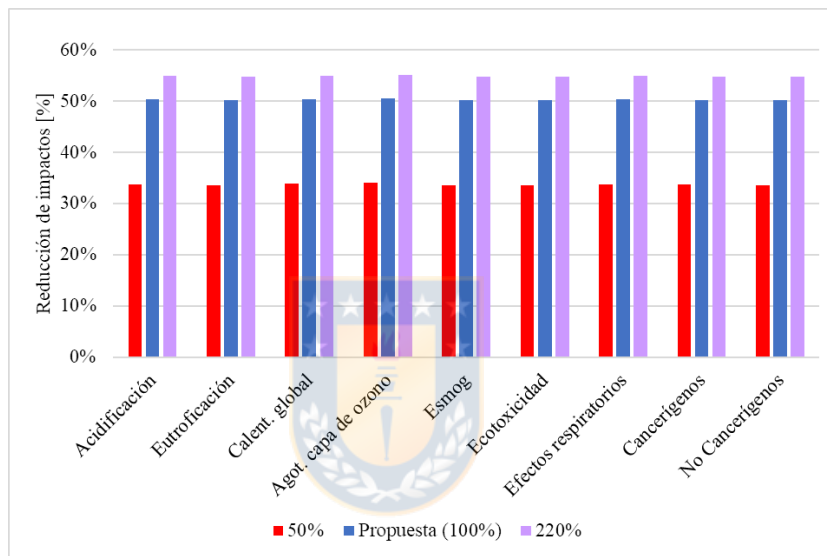


Figura 4.7 Reducción de impactos en función de mejora de vida útil del durmiente de ferrocarril

La segunda variable considerada es la distancia de transporte de los materiales reciclados, hasta la planta de producción de durmientes. Como se muestra en la Figura 4.8, existe una relación inversa entre la distancia de transporte y la reducción de impactos ambientales, donde a medida que aumenta la distancia, la reducción de estos impactos es menor. Sin embargo, estas variaciones son leves, de no más del 1% en cada categoría. De forma similar a la aplicación analizada anteriormente, debido a que la mejora en la vida útil del durmiente es alta, las demás variables, como el transporte del material reciclado, pierden importancia en el ACV.



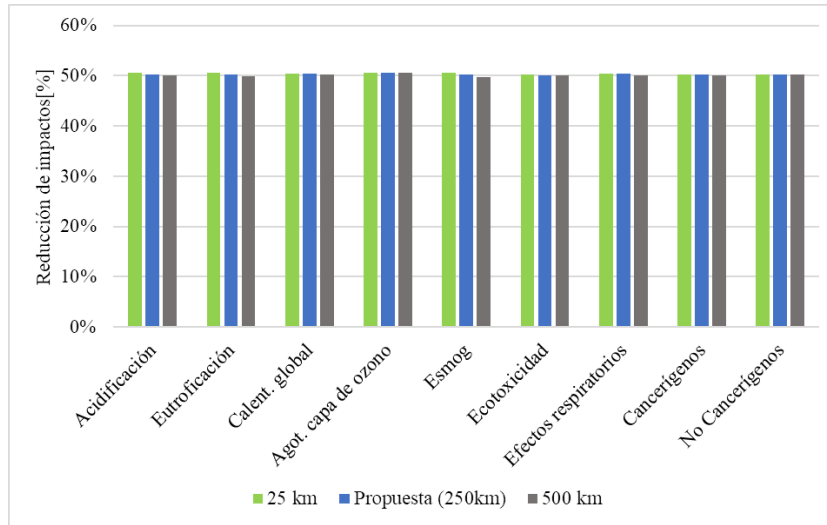


Figura 4.8 Reducción de impactos del durmiente de ferrocarril propuesto, en función de la distancia de transporte material reciclado

### 4.2.3 Mortero de pega y estuco para albañilería

#### a) Ensayos experimentales



La Figura 4.9 presenta los resultados de resistencia a la compresión de morteros bajo los tres tratamientos (R1, R2 y R3) y con caucho NFU no tratado (R0).

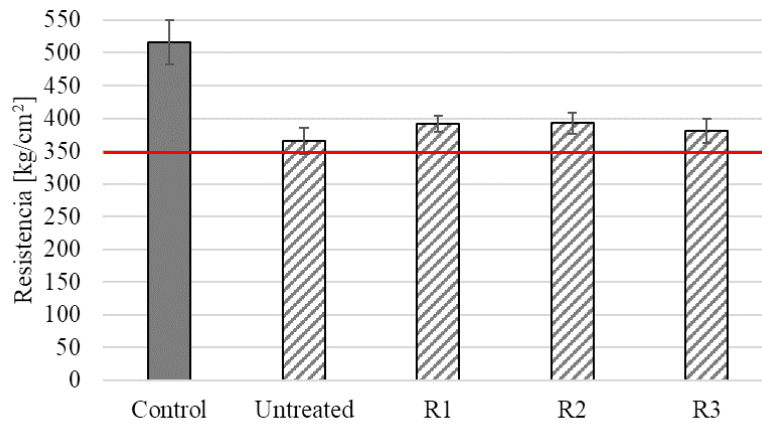
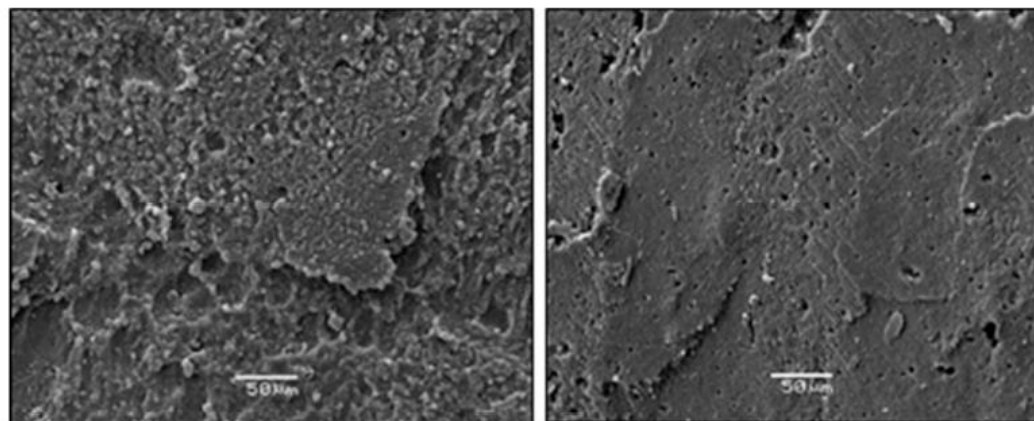


Figura 4.9 Resistencia a la compresión de morteros con adición de caucho en un 5 % de reemplazo, tamaño de grano T1, utilizando cemento C1, con edad de 28 días (Adaptado de García et al., 2021).

En comparación con el mortero control, en todos los casos, la resistencia a la compresión es menor. Con una pérdida del 29% en el caso del mortero con caucho sin tratar (R0), 24% cuando el caucho está bajo el tratamiento de hidratación (R1), 24% bajo el tratamiento de oxidación + sulfonación (R2) y del 26% con el tratamiento de contacto con peróxido de hidrogeno (R3). Si bien es cierto el promedio de las muestras con caucho sin tratar (R0) cumple con la resistencia de diseño, esto no es así para en todas las muestras ensayadas como lo refleja la desviación estándar. Por el contrario, cuando el caucho posee alguno de los tres tratamientos, siempre se cumple con la resistencia de diseño de  $350 \text{ kg/cm}^2$ , considerando la desviación estándar. Esto es válido para los tres tratamientos, pero con mejores resultados para los tratamientos R1 y R2.

Si bien los tratamientos R1 y R2 proporcionan morteros con resistencias a la compresión similares, el primero de ellos (R1) es mucho más fácil de aplicar en la práctica, debido a que utiliza elementos y sustancias de fácil acceso (agua) y menor coste, por lo que, si se consideran estos aspectos, el tratamiento R1 posee claras ventajas sobre R2.

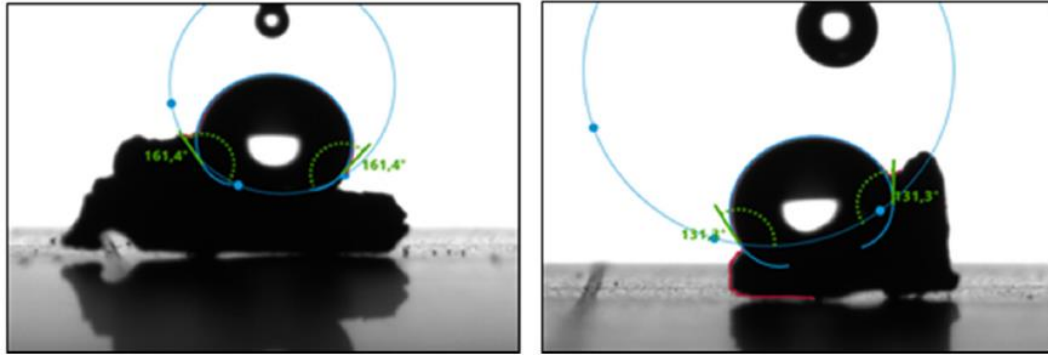
Los resultados anteriores, a nivel macro, son confirmados por los análisis SEM (Figura 4.10) y ángulo de contacto (Figura 4.11). Es posible visualizar que los tratamientos son capaces de alterar la rugosidad de la superficie del caucho y el ángulo de contacto entre esta y el agua. Esto finalmente implica una mejora en la interacción entre el caucho reciclado de NFU y la matriz cementicia, permitiendo un mortero con adición de caucho que cumple con la resistencia de diseño inicial.



a) sin tratamiento (R0)

b) bajo el tratamiento de hidratación (R1)

Figura 4.10 Superficie del caucho (García et al., 2021).



a) caucho sin tratamiento (R0) 161.4°      b) caucho bajo el tratamiento de hidratación (R1) 131.3°

Figura 4.11 Angulo de contacto (García et al., 2021).

Así, en función de los resultados anteriormente expuestos, se ocupó el tratamiento de hidratación (R1) en el caucho de NFU incorporado a los morteros para albañilería. En la Figura 4.12 y Figura 4.13 es posible observar la variación de la resistencia tanto a la compresión como flexión de las muestras ensayadas en función del porcentaje de reemplazo de caucho. Como era de esperar, la resistencia disminuye drásticamente con porcentajes altos, razón por la cual la mezcla fue diseñada para una resistencia a la compresión mayor, que en este caso corresponde a 100 kg/cm<sup>2</sup>, que con un 20% de reemplazo disminuye a poco más de los 50 kg/cm<sup>2</sup>, que es la resistencia requerida.

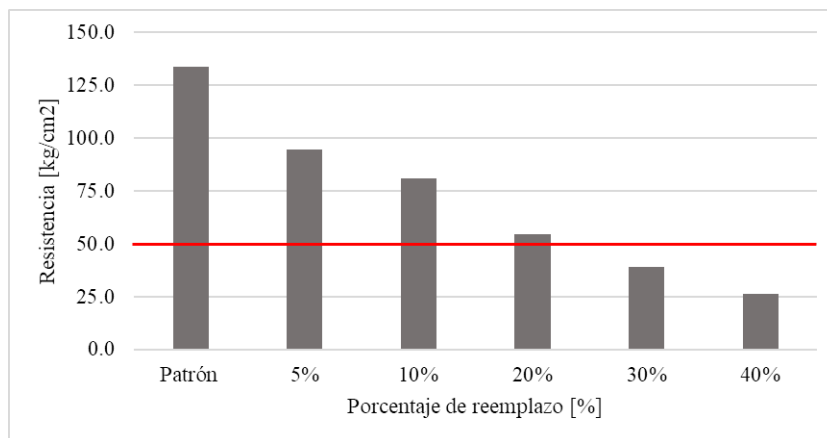


Figura 4.12 Resistencias a la compresión de las muestras

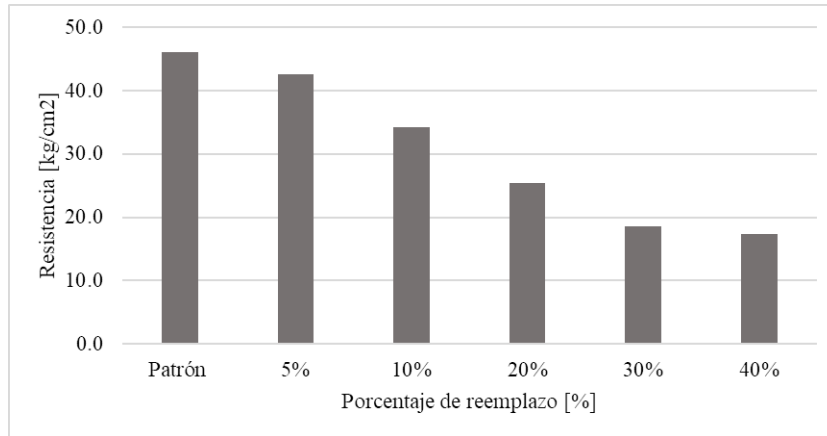


Figura 4.13 Resistencia a la flexión de las muestras

b) Inventario

Del análisis de inventario realizado, y en base a la dosificación establecida en el programa experimental, se tiene la cantidad de material utilizado en la vivienda, como mortero de pega y de estuco de los muros perimetrales, en la Tabla 4.3. Esto, para el caso control, y la propuesta, que posee caucho reciclado de NFU.



Tabla 4.3 Materiales utilizados en la vivienda

Material [kg]	Caso	
	Control	Propuesta
Cemento	1712.7	1994.5
Arena	5720.4	3827.7
Agua	1366.4	1376.0
Caucho granulado	0.0	956.9

c) Resultados simulación energitèrmica

La configuración espacial de esta vivienda se muestra en la Figura 4.14, la cual consta de tres dormitorios, baño y un espacio común de comedor, sala de estar y cocina, con un total de 48 m<sup>2</sup>. Esta fue primero dibujada en SketchUp para luego ser exportada a OpenStudio, donde fue necesario caracterizar cada uno de los elementos de la envolvente, con sus propiedades térmicas, además de definir parámetros referentes a la ubicación de esta. Esto, a partir de los Estándares de Construcción

Sustentable (MINVU, 2018), que contiene información respecto a temperaturas de confort, ocupación de la vivienda, uso de iluminación, cargas internas, etc., según la ubicación de la vivienda.

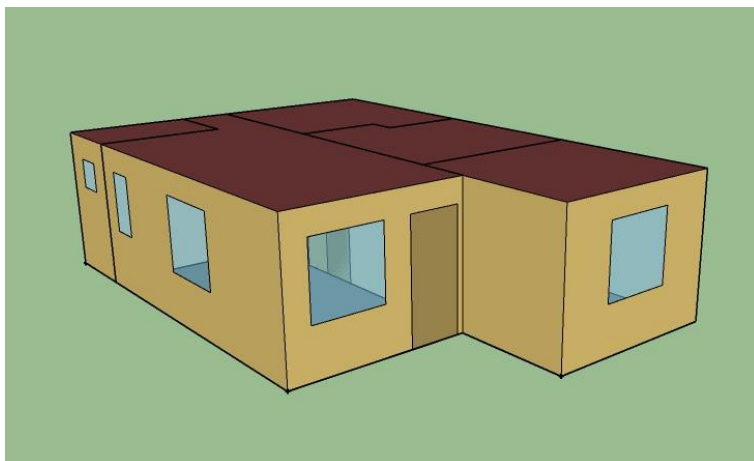


Figura 4.14 Configuración espacial de la vivienda

Con ello, se realizó la simulación de la misma vivienda en cuatro comunas del país, con distintas características climáticas que implicaran consumos energéticos distintos. Estos se muestran en la Figura 4.15, donde es posible visualizar que, en cada uno de ellos, existe una disminución de consumo energético para la mantención del confort interno. Este consumo está asociado a calefacción y enfriamiento principalmente, además de la iluminación, la cual varía en función de la comuna donde se encuentra emplazada la vivienda. En las ciudades con menores temperaturas, como era de esperar, el consumo energético es mucho mayor, como sucede, por ejemplo, en Punta Arenas, donde prácticamente es el triple que en la ciudad de Santiago o Concepción.

Para el posterior análisis de los impactos ambientales, se consideró la comuna de Concepción como base en cuanto al nivel de consumo energético, donde de acuerdo con lo mostrado en la Figura 4.15, la reducción en el consumo de energía es cercana al 8.6%. Esto, a raíz de que el nivel de ahorro conseguido en las distintas comunas es similar en todos los casos. Puesto que el análisis se basa en la fase de uso de la vivienda, donde se consume energía para mantener el confort térmico en la vivienda, fue necesario considerar un periodo de análisis, que se estableció en 50 años desde su construcción, periodo comúnmente utilizado en análisis de este tipo (Sartori y Hestnes, 2007; Stephan y Crawford, 2016).

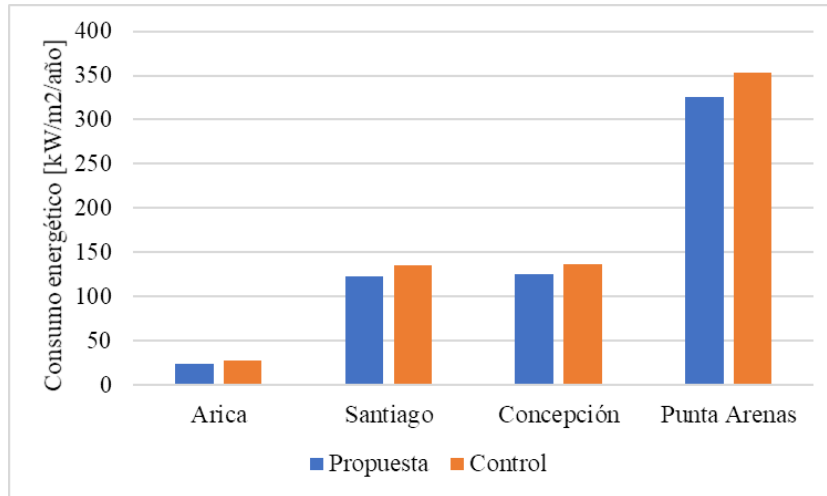
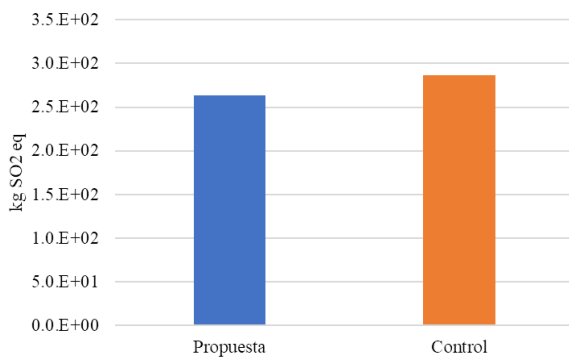


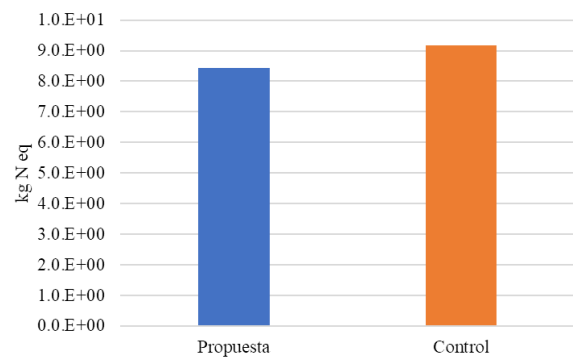
Figura 4.15 Consumo energético de la vivienda

d) Resultados del ACV

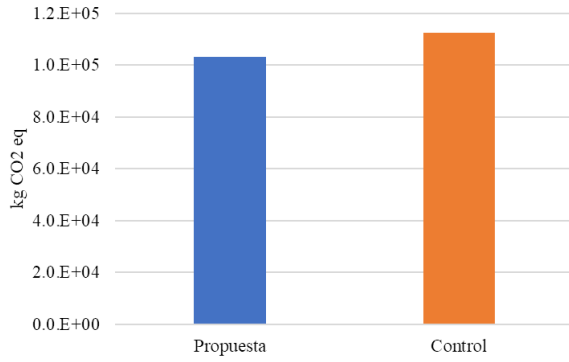
Los resultados en cada una de las categorías analizadas, tanto para el caso control sin adición de material reciclado y el caso propuesto que posee caucho de NFU, se muestran en la Figura 4.16. En cada una de las categorías de impacto, la vivienda con muros de mortero con caucho de NFU, genera menores impactos ambientales que el caso control.



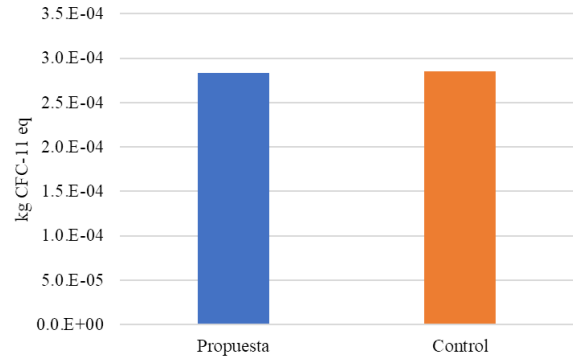
a) Acidificación



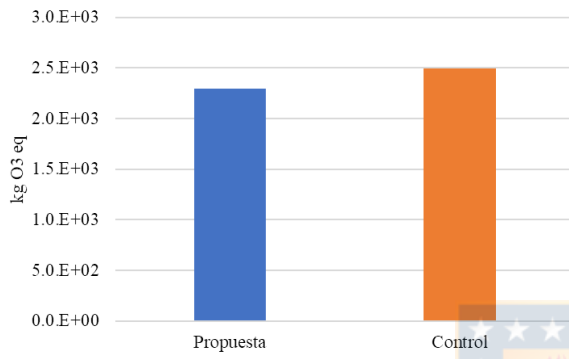
b) Eutroficación



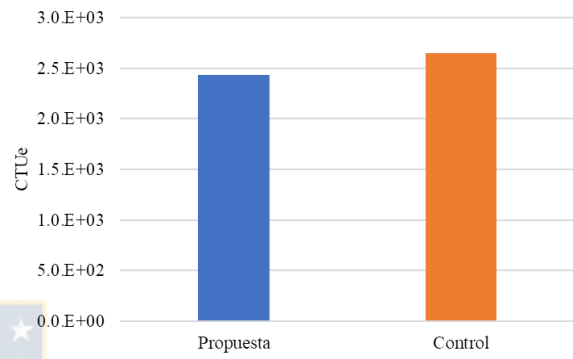
c) Calentamiento Global



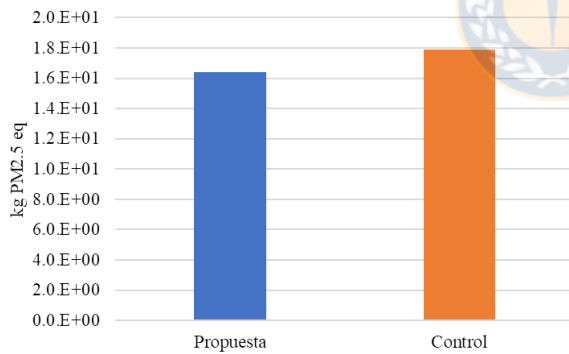
d) Agotamiento de la capa de ozono



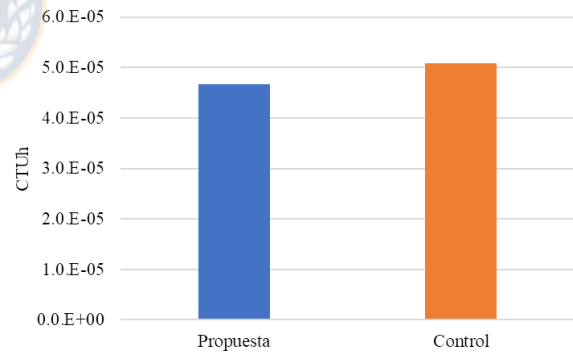
e) Esmog



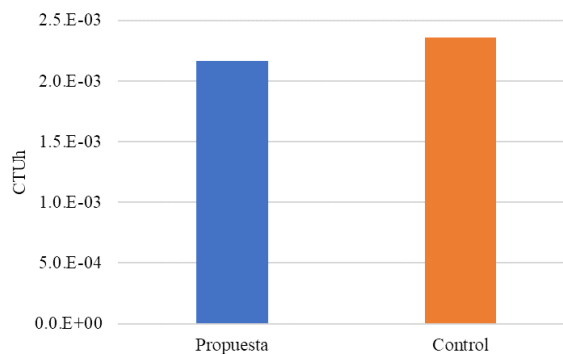
f) Ecotoxicidad



g) Efectos respiratorios



h) Efectos cancerígenos



i) Efectos no cancerígenos

Figura 4.16 Resultados por categoría de impacto del mortero propuesto

La Figura 4.17 presenta la reducción porcentual de impactos ambientales que implica la utilización del caucho en la albañilería. Como es posible observar, la reducción de impactos está por sobre el 8% en ocho de las nueve categorías analizadas. Solo en uno de estas, específicamente en Agotamiento de la capa de ozono, existe una disminución menor, cercano al 0 %, respecto al caso tradicional, lo que se debe a la modificación de la dosificación utilizada en el mortero, con el fin de mantener la resistencia a la compresión requerida.

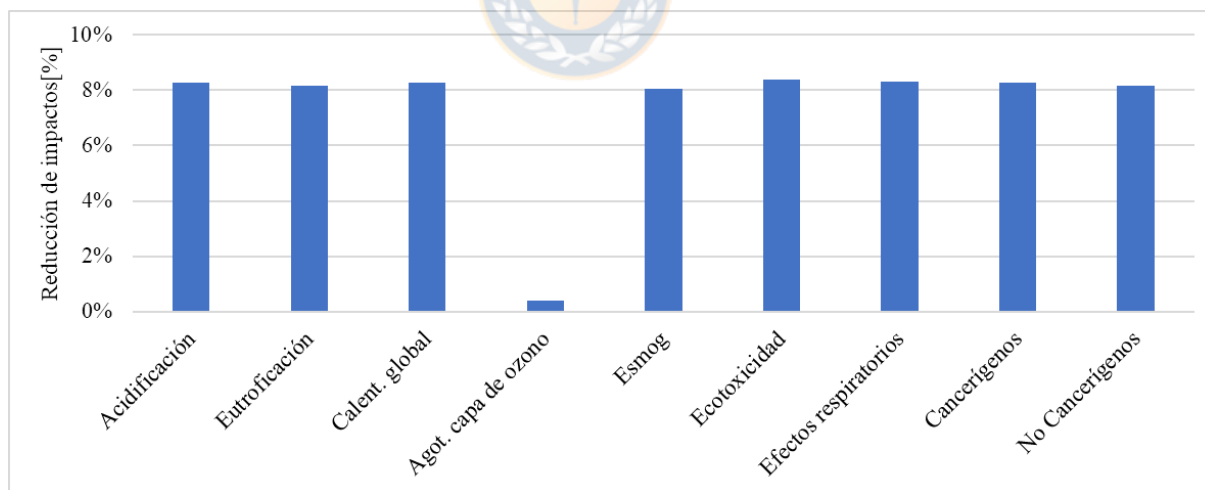


Figura 4.17 Reducción de impactos con el uso del mortero propuesto

Esta reducción en los impactos ambientales está relacionada directamente con el mayor nivel de aislamiento térmico que adquiere el mortero propuesto, el cual proviene de la adición del caucho reciclado de NFU, que implica una reducción del consumo energético de la vivienda, tanto para calefacción como enfriamiento.



e) Análisis de sensibilidad

En primer lugar, se analizó el comportamiento del porcentaje de reducción de impactos en cada una de las categorías, en función de la reducción en el consumo de energía interna. Los resultados se presentan en la Figura 4.18. En este caso, la reducción de impactos es altamente dependiente de este valor y tiene una relación directa. Si mejora en el nivel de aislación térmica de la vivienda es menor al caso simulado, sucede que, según una categoría de impacto, Agotamiento de la capa de ozono, deja de ser ambientalmente beneficioso, puesto que no se compensa una menor reducción en el consumo de energía en la vivienda, con la modificación en la dosificación del mortero. Como era de esperar, si la reducción en el consumo energético de la vivienda es mayor al estudiado en el escenario inicial, la reducción de impactos es mayor en cada una de las categorías de impactos analizadas.

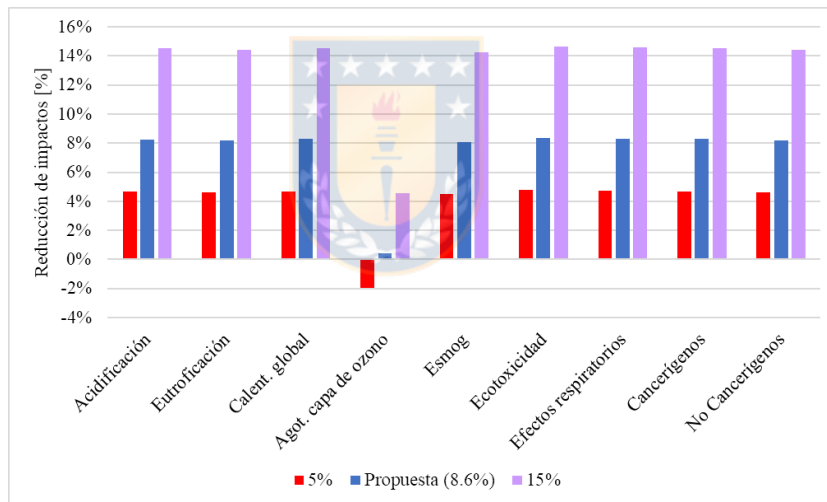


Figura 4.18 Reducción de impactos del mortero propuesto, en función de la distancia de transporte material reciclado

La segunda variable analizada corresponde a la distancia de transporte del caucho granulado de NFU, hasta el lugar de construcción de la vivienda. Como se muestra en la Figura 4.19, la variación de la reducción de impactos en las distintas categorías, en función de la distancia, es marginal. Esto se debe a que la reducción de impactos ambientales producto del uso de caucho de NFU en el mortero de albañilería, es altamente dependiente del consumo energético de la vivienda, por lo que

otras variables como la distancia de transporte del material reciclado de NFU pierde relevancia en el ACV.

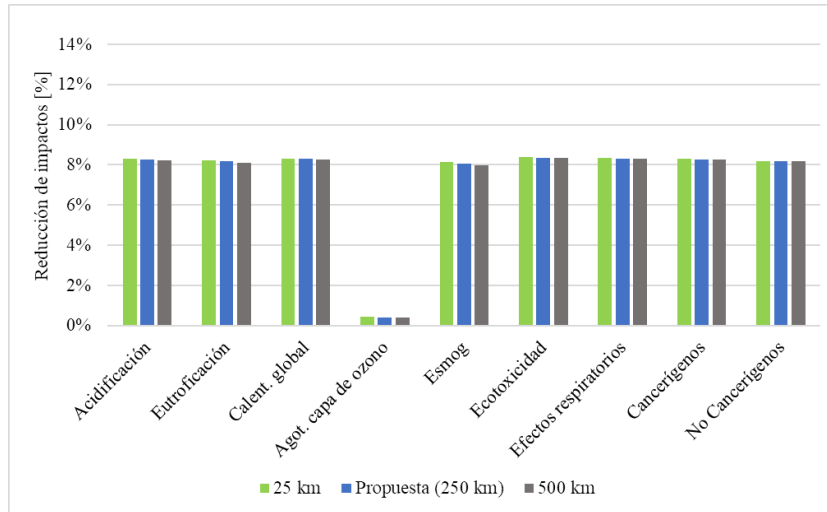


Figura 4.19 Reducción de impactos en función de la reducción en el consumo energético de la vivienda

f) Escenario con una resistencia a la compresión requerida mayor

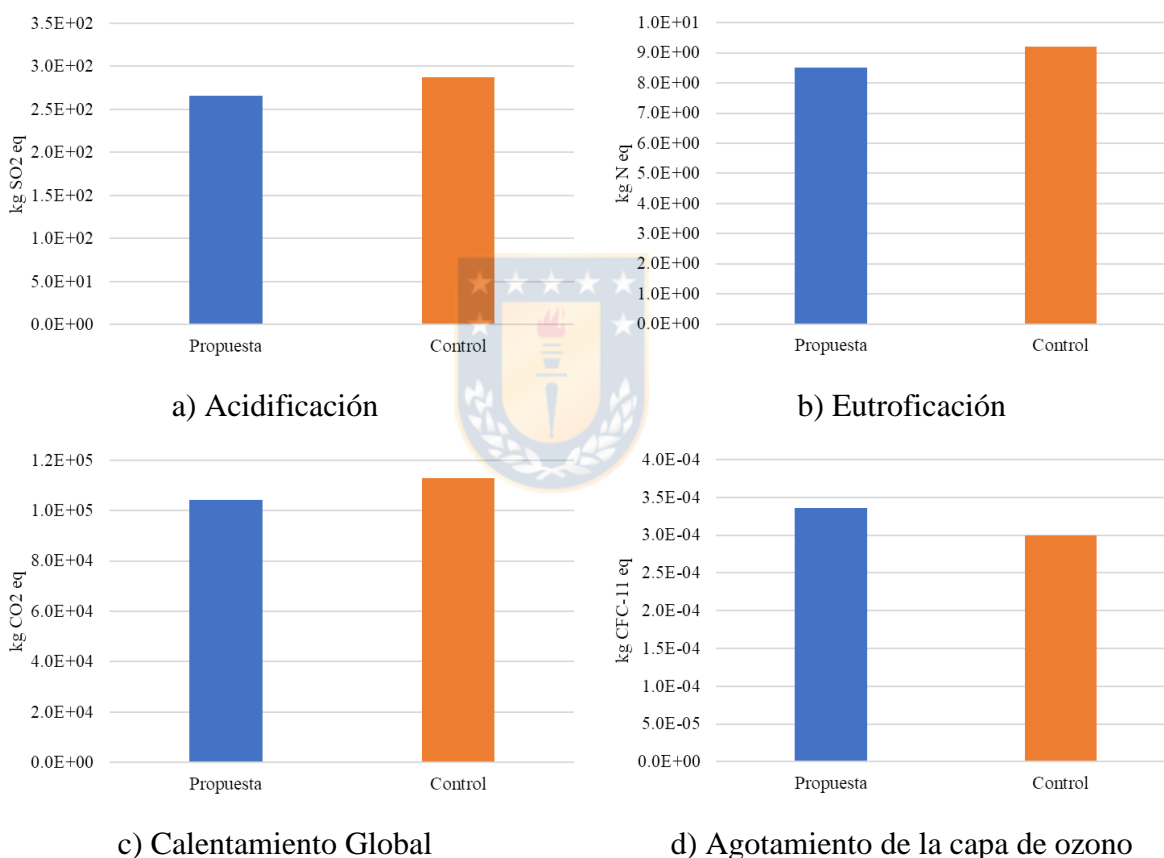
Además de este caso de mortero con adición de caucho de NFU se analizó un escenario más, donde la resistencia a la compresión requerida fue de 100 kg/cm<sup>2</sup>. Debido a esto, la dosificación del mortero para la albañilería fue modificado, mostrándose la cantidad de materiales del caso base y propuesto en la Tabla 4.4. Cabe destacar que la cantidad de cemento de la propuesta es mucho mayor al caso control, por lo que es de esperarse categorías de impacto que muestren que esta propuesta no sea beneficiosa en términos ambientales.

Tabla 4.4 Materiales utilizados en la vivienda con mortero de mayor resistencia

Material [kg]	Caso	
	Control	Propuesta
Cemento	1982.0	2927.0
Arena	5458.4	3186.9
Agua	1366.4	1376.0
Caucho granulado	0.0	796.7

g) Resultados del ACV

Los resultados en cada una de las categorías analizadas, tanto para el caso control sin adición de material reciclado y el caso propuesto que posee caucho de NFU, se muestran en la Figura 4.20. En 8 de 9 categorías analizadas, la vivienda con muros de mortero con caucho de NFU, genera menores impactos ambientales. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, en la categoría de impacto Agotamiento de la capa de ozono, la propuesta implica mayores impactos ambientales, que el caso control.



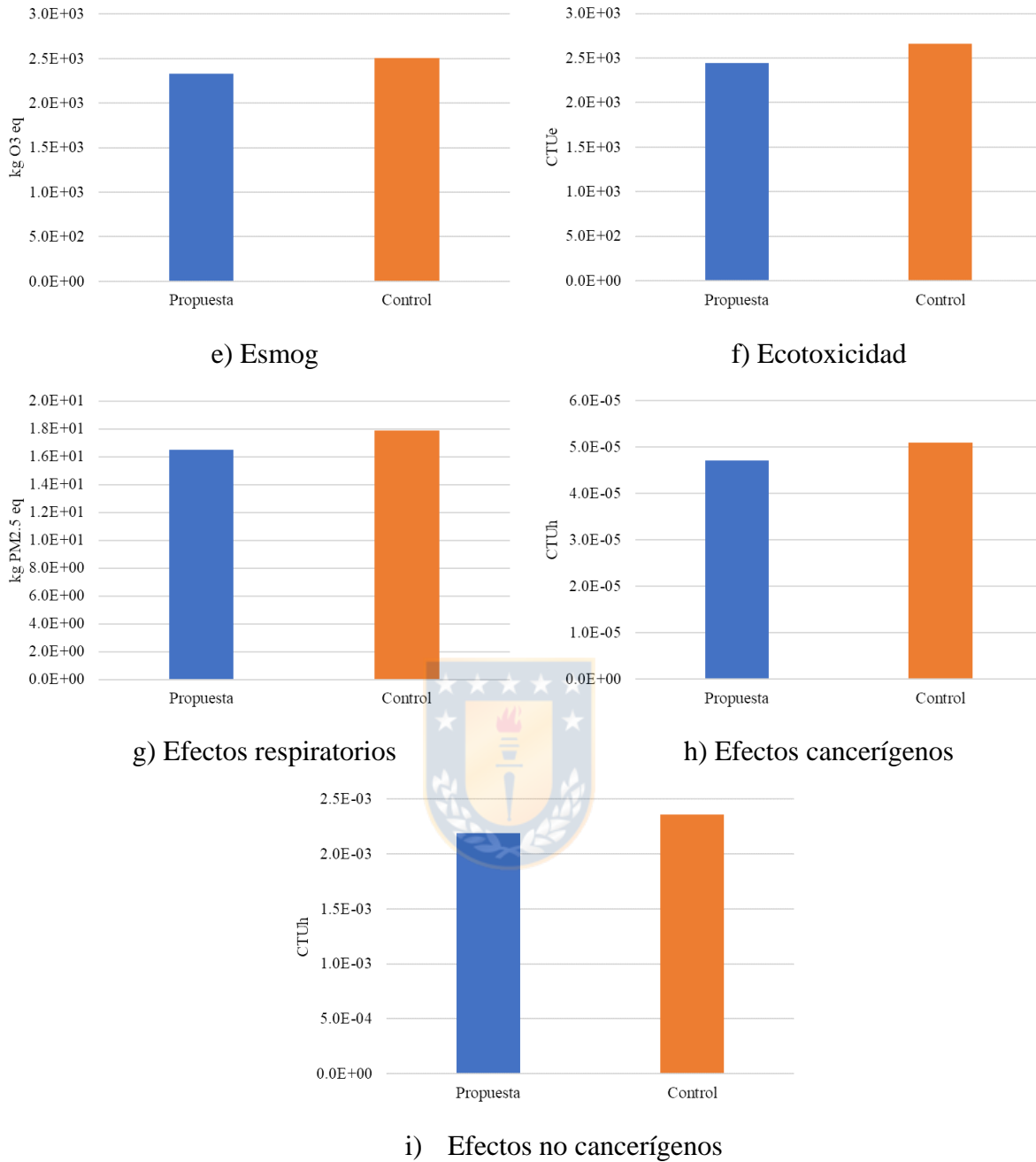


Figura 4.20 Resultados por categoría de impacto del mortero con resistencia mayor

La Figura 4.21 presenta la reducción porcentual de impactos ambientales que significa la utilización del caucho en la albañilería. Como es posible observar, la reducción esta por sobre el 7% en ocho de las nueve categorías de impacto analizadas. Solo en uno de ellos, específicamente en Agotamiento de la capa de ozono, existe un aumento, cercano al 12%, respecto al caso

tradicional, lo cual sucede debido al aumento en la cantidad de cemento que compone tanto el mortero de pega como albañilería.

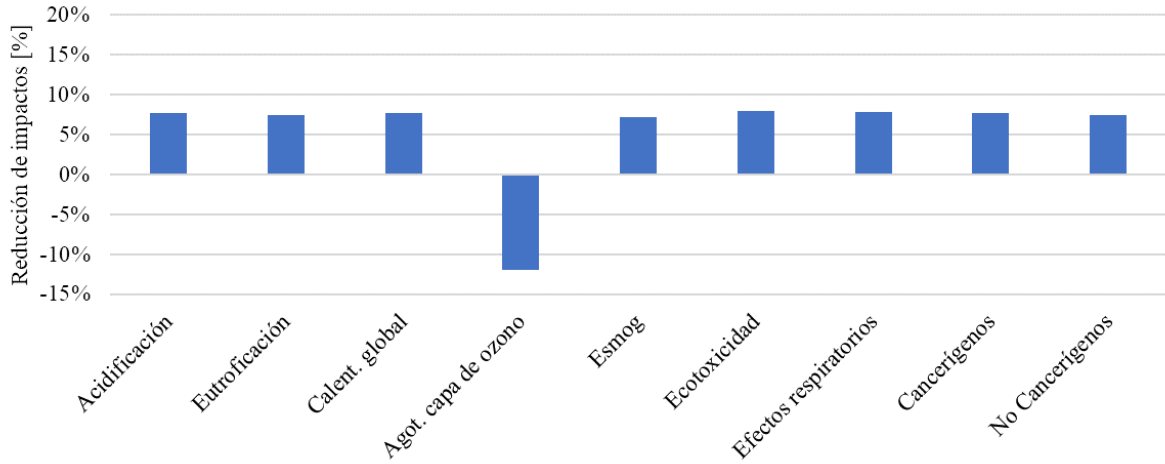
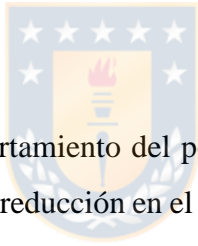


Figura 4.21 Reducción de impactos con el uso del mortero propuesto de mayor resistencia

h) Análisis de sensibilidad

En primer lugar, se analizó el comportamiento del porcentaje de reducción de impactos en cada una de las categorías, en función de la reducción en el consumo de energía interna que se consideró igual que en el primer escenario. Los resultados se presentan en la Figura 4.22. En este caso, el porcentaje de reducción de impactos es altamente dependiente de este valor y tiene una relación directa. Se observa que en todos los escenarios la categoría de impacto Agotamiento de la capa de ozono resulta en un aumento de los impactos de la propuesta en comparación al caso base, cercano al 15% cuando la reducción del consumo energético es del 5%, por lo que sería una aplicación no recomendable en términos ambientales.



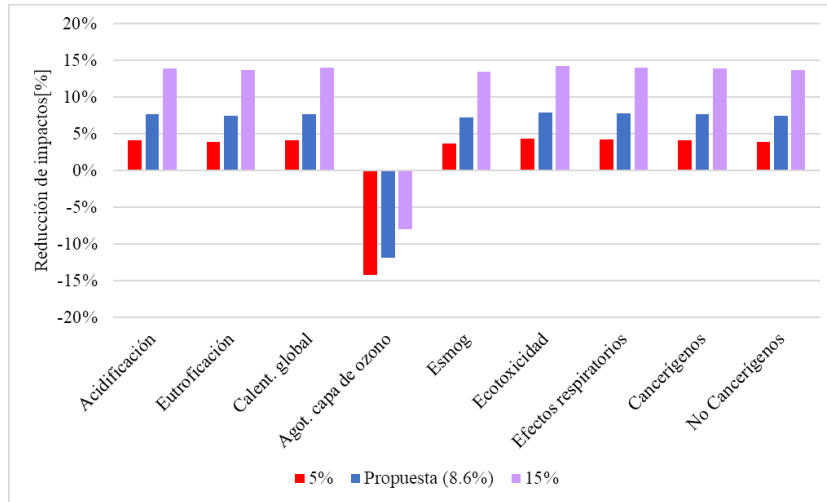


Figura 4.22 Reducción de impactos en función de la reducción en el consumo energético de la vivienda

La otra variable analizada corresponde a la distancia de transporte de los materiales reciclados, caucho granulado y fibra de acero de NFU, hasta el lugar de construcción de la vivienda. Como se muestra en la Figura 4.23, la variación de la reducción de impactos en las distintas categorías, en función de la distancia es imperceptible, por lo que no sería un factor importante que considerar. Esto al igual que en los escenarios anteriores, se debe a la relevancia de la reducción del consumo energético de la vivienda.

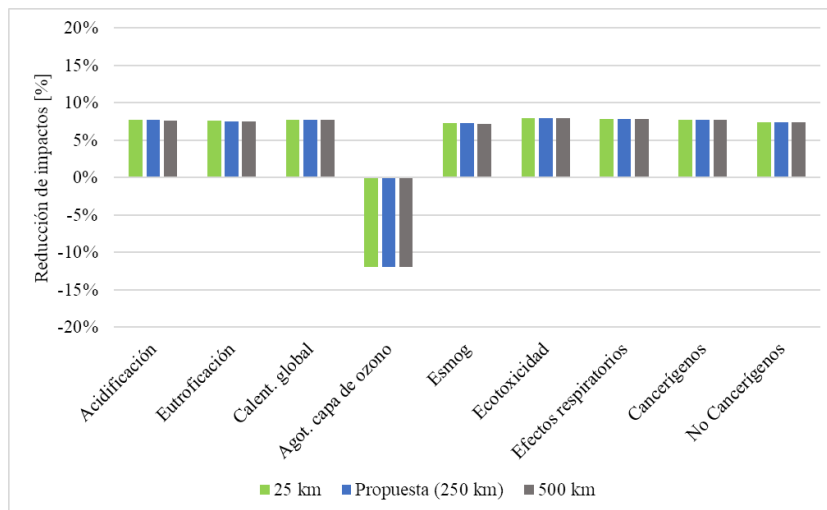


Figura 4.23 Reducción de impactos del mortero propuesto, con mayor resistencia, en función de la distancia de transporte material reciclado

#### 4.2.4 Pavimentos de hormigón

##### a) Inventario

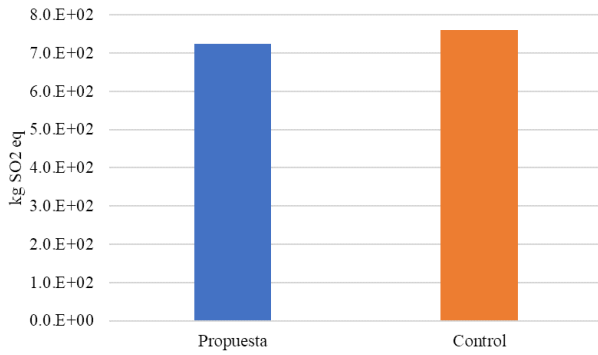
Del análisis de inventario realizado, y en base a la dosificación utilizada por (Alsaif et al., 2019), se tiene que la cantidad de material utilizado por kilómetro lineal de pavimento es la que se muestra en la Tabla 4.5, tanto para el caso control, sin adición de materiales reciclados de NFU, y la propuesta, que posee caucho granulado y fibra de acero reciclada de NFU.

Tabla 4.5 Materiales por kilómetro lineal de pavimento

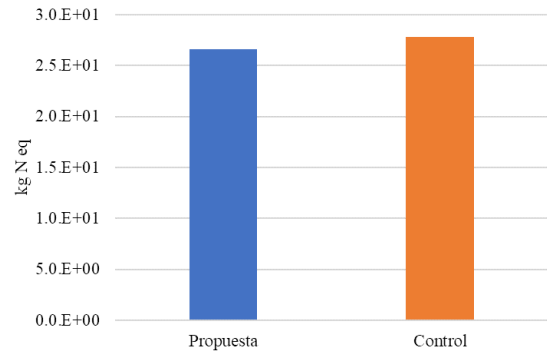
Material [ton]	Caso	
	Control	Propuesta
Cemento	263.2	248.9
Humo de sílice + Pulverised Fuel ash	65.8	62.2
Arena	634.7	420.2
Gravilla	281.7	185.9
Grava	493.0	326.5
Agua	116.1	109.8
Aditivo plastificante	5.9	6.1
NFU	0.0	138.9
Fibra de acero	0.0	29.3

##### b) Resultados del ACV

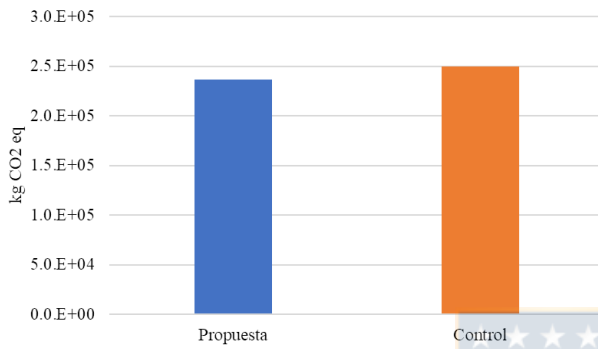
Los resultados en cada una de las categorías analizadas, tanto para el caso control sin adición de material reciclado y el caso propuesto que posee caucho y fibra de acero reciclado de NFU, se muestran en la Figura 4.24. En cada una de las categorías de impacto, pavimento propuesto posee menores impactos ambientales, que el caso control.



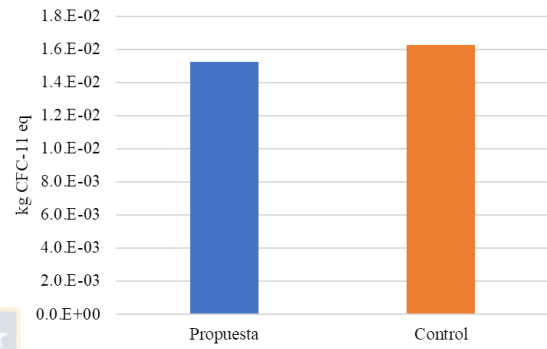
a) Acidificación



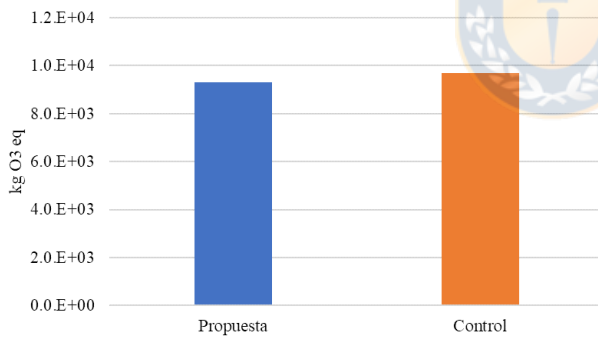
b) Eutroficación



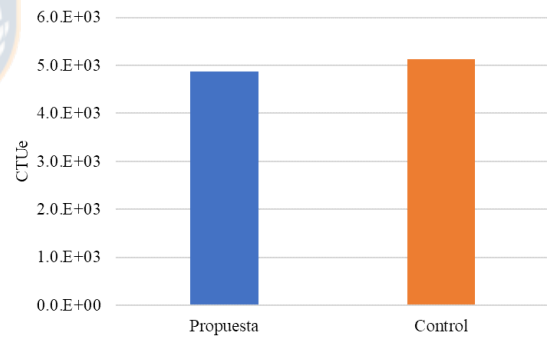
c) Calentamiento Global



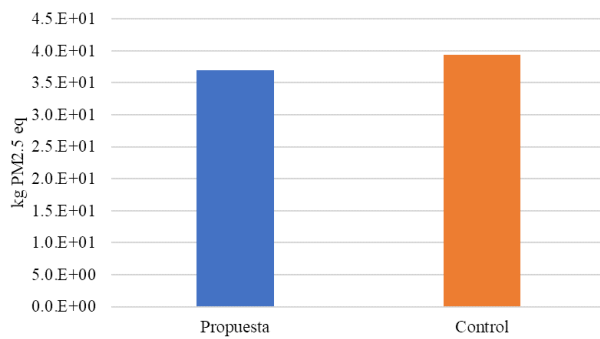
d) Agotamiento de la capa de ozono



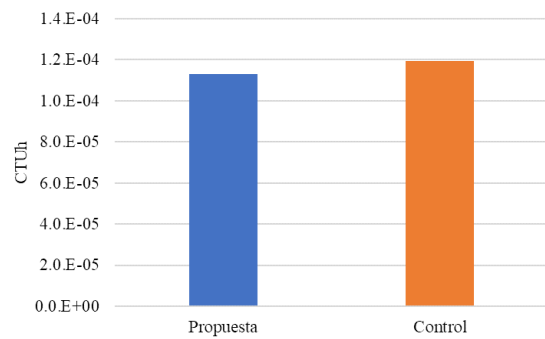
g) Efectos respiratorios



h) Efectos cancerígenos

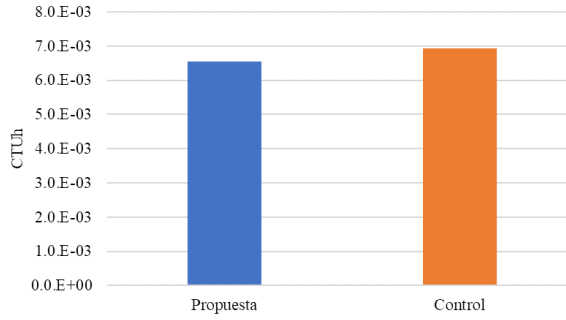


g)



h)





i) Efectos no cancerígenos

Figura 4.24 Resultados por categoría de impacto del pavimento

La Figura 4.25 presenta la reducción porcentual de impactos ambientales que significa la utilización del pavimento propuesto frente al caso control. Como es posible observar, la reducción está por sobre el 4% en cada una de las categorías de impacto, lo que refleja que un pavimento como el propuesto sería capaz de contribuir a una construcción más sustentable. Estas ventajas del pavimento propuesto están relacionadas directamente con la reducción de espesor, que es posible considerar utilizando material reciclado de NFU, reduciendo la cantidad de materiales en su producción.

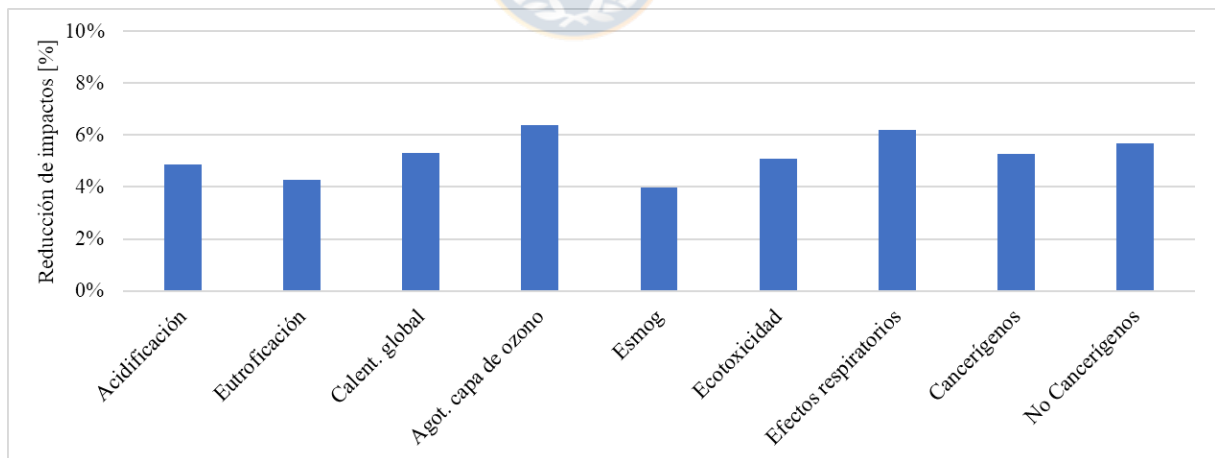


Figura 4.25 Reducción de impactos con el uso del pavimento propuesto

c) Análisis de sensibilidad

En la 6 se muestra la reducción de impactos promedios, cuando la disminución del espesor posible, asumida en un inicio del 5%, difiere de esa cantidad en cierto rango probable. En este caso, el

porcentaje de reducción de impactos es altamente dependiente de este valor y tiene una relación directa. En el mejor de los casos, cuando la disminución del espesor fuera del 26%, la reducción de los impactos ambientales podría estar sobre el 20% en todas las categorías estudiadas. Este valor del 26% de disminución del espesor, ha sido estudiado (Alsaif et al., 2019; Graeff et al., 2012) y es posible cuando se agrega solo fibra de acero reciclada de NFU, por lo que en esta aplicación en particular, es recomendable disminuir la cantidad de caucho de NFU y mantener la fibra de acero, con lo que sería posible llegar a mejores resultados que los presentados en el escenario inicial.

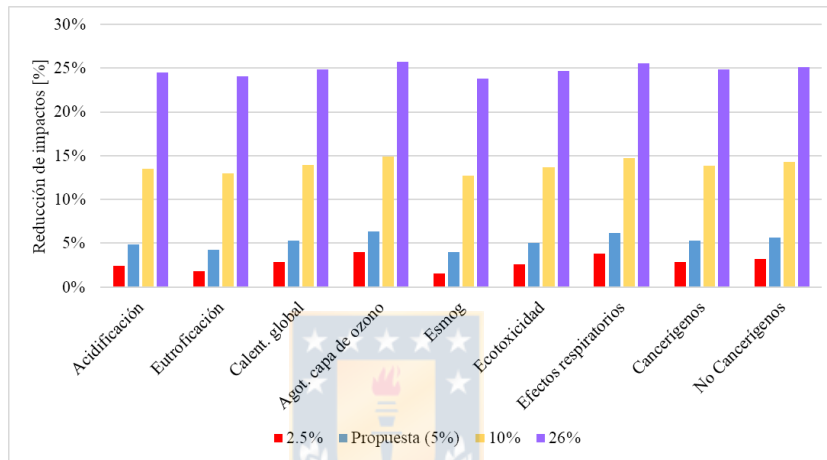


Figura 4.26 Reducción de impactos en función del espesor del pavimento propuesto

La otra variable analizada corresponde a la distancia de transporte de los materiales reciclados, caucho granulado y fibra de acero de NFU, hasta la ubicación del pavimento. Como se muestra en la Figura 4.27, existe una relación inversa entre la distancia de transporte y reducción de impactos. Este factor cobra relevancia en distintas categorías, especialmente en la categoría Eutroficación y Esmog. Particularmente en esta última, si el transporte del material reciclado de NFU es de 500 km, no existe una reducción de impactos, por lo que no sería una aplicación recomendable, en términos ambientales.

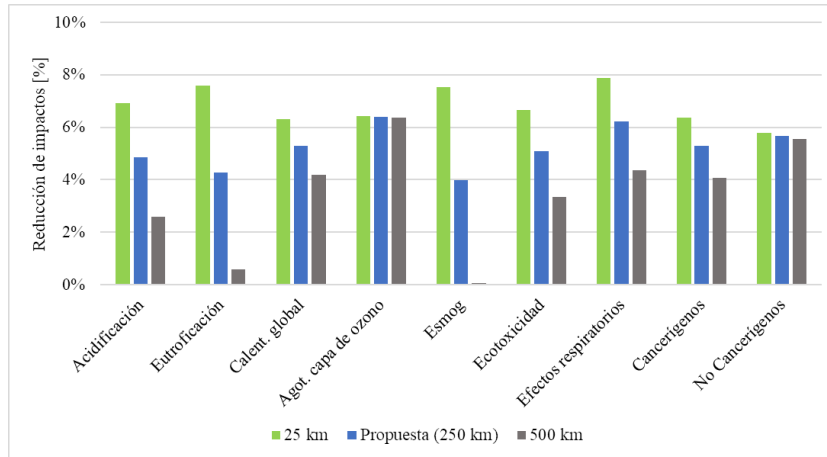


Figura 4.27 Reducción de impactos del pavimento propuesto, en función de la distancia de transporte material reciclado

Los resultados en detalle para cada una de las aplicaciones analizadas se encuentran en el Anexo 4.1.

### 4.3 Conclusiones

Así, quedan expuestos los resultados de esta investigación junto con el análisis de cada uno de ellos. Queda en evidencia la reducción de los impactos ambientales que es posible alcanzar en cada una de las categorías analizadas, en los distintos casos estudiados. En la barrera de seguridad propuesta se evidencia una disminución mayor al 60% de los impactos ambientales en cada una de las categorías. En el caso de los durmientes de ferrocarril este valor sobrepasa el 50%. Para la vivienda analizada con mejoras térmicas en su envolvente, el porcentaje de reducción de impactos ambientales está sobre el 8% en ocho de las categorías analizadas. En el último caso analizado, pavimento de hormigón, la mejora esta por sobre el 4%. Si bien, existen supuestos importantes detrás de cada calculo, cada uno de ellos se encuentra fundamentado en otros estudios previos, y que ante variaciones en estos las cuales también fueron analizadas, los casos siguen presentando disminución de impactos ambientales. Sin embargo, se debe tener cuidado con aplicaciones que requieran, por ejemplo, adición de una mayor cantidad de cemento para mantener ciertas propiedades, pues en esos casos, pueden existir resultados ambientales desfavorables. Otro factor relevante que se presenta en el pavimento estudiado es el transporte del material reciclado de NFU,

que en este caso en particular puede implicar, en ciertas categorías, que no sea beneficioso en términos ambientales.

Aunque las bases de datos utilizadas no son locales, este estudio constituye una ayuda en toma de decisiones considerando aspectos ambientales. Disponer de datos en forma local, sería útil para mejorar la precisión de este tipo de investigaciones, para lo que es necesario y deseable, una relación más estrecha entre fabricantes de productos, ingenieros, arquitectos y empresas de construcción.



## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en cada una de las aplicaciones propuestas, debido a la incorporación de material reciclado de NFU, muestran disminuciones considerables de los impactos ambientales en cada una de las categorías estudiadas. Esto incluso, con distintas condiciones iniciales analizadas, sean estas, distancia de transporte de los nuevos materiales, que fueron consideradas entre 25 y 500 km o, por ejemplo, en el caso de la barrera de seguridad propuesta, la variación de su vida útil esperada entre un 50 y 220%.

El porcentaje de reducción de impactos ambientales en las cuatro aplicaciones analizadas, la barrera de seguridad, el durmiente de ferrocarril, el mortero de albañilería y el pavimento de hormigón, varía desde un 4% en el caso de un pavimento de hormigón, hasta más de un 60% en el caso de la barrera de seguridad de hormigón.

Los anteriores resultados se basan en los beneficios técnicos que la incorporación de materiales reciclados de NFU produce en hormigones. Estos son, mejoras en cuanto a la vida útil de elementos como la barrera de seguridad y durmientes de ferrocarril en un 160% y 100%, respectivamente. En el caso del mortero de albañilería, una reducción de más del 8% en el nivel de consumo energético dentro de una vivienda y en el pavimento de hormigón, una disminución de su espesor en un 5%.

La barrera de seguridad es la aplicación que muestra los mejores resultados ambientales con una reducción de más de un 60%, en cada una las categorías de impacto analizadas. Específicamente en la categoría Calentamiento global, esta reducción implica más de 300 ton de CO<sub>2</sub>-eq por kilómetro lineal de barrera. Esto se debe a la menor necesidad de reemplazos en el ciclo de vida de la barrera, en comparación al caso tradicional, pues su vida útil se ve aumentada en un 160% debido al uso de material reciclado de NFU.

En el caso del durmiente de ferrocarril, la reducción de impactos ambientales en cada una de las categorías está por sobre el 50%. Considerando la misma categoría de impacto que en la aplicación anterior, el durmiente de hormigón con adición de material reciclado de NFU implica una reducción de más de 65 ton de CO<sub>2</sub> eq por kilómetro lineal instalado. Ambas aplicaciones muestran claros

beneficios ambientales en esta y las demás categorías de impacto, pues la incorporación de materiales reciclados de NFU implica directamente una mejora en la vida útil de los elementos de las aplicaciones.

En el caso de morteros para albañilería ocurre que los beneficios ambientales no son de la magnitud de las mostradas previamente, pero igualmente implican reducciones considerables. En ocho de las nueve categorías analizadas la reducción de impactos ambientales está por sobre el 7%. En la categoría Agotamiento de la capa de ozono, la disminución de impactos es marginal cercano al 0%. Esto debido a requisitos de resistencia mecánica, que implican la modificación de su dosificación agregando un porcentaje menor de cemento. Específicamente en la categoría de impacto Calentamiento global la disminución es de 8 ton de CO<sub>2</sub> eq. En el segundo escenario analizado de esta aplicación, cuando el requisito de resistencia a la compresión se aumenta al doble, es decir 100 kg/cm<sup>2</sup>, la adición extra de cemento implica problemas en la categoría de impacto Agotamiento de la capa de ozono, donde en todos los casos resulta negativo, es decir, con aumento de impactos ambientales según esa categoría.

En la última aplicación analizada, pavimentos de hormigón, el porcentaje de reducción de impactos ambientales es menor, cercano al 4% en cada una de las categorías analizadas, debido principalmente a que el porcentaje de caucho a añadir es alto. Aun así, en la categoría Calentamiento global, por ejemplo, se produce una disminución de 13 ton de CO<sub>2</sub> eq por kilómetro lineal de pavimento. Esta reducción inicial puede verse aumentado hasta un 20% si el porcentaje de caucho añadido fuere menor, ya que así, el espesor puede ser disminuido hasta un 26%. Por eso, en este tipo de aplicaciones no es recomendable un alto contenido de caucho. En el escenario estudiado, cuando la distancia de transporte de material reciclado de NFU es igual a 500 km, categorías de impacto como Esmog, indican que esta alternativa no implica reducción de impactos ambientales. Con esto se demuestra que el transporte es una variable que debe ser considerada en este tipo de estudios, pues puede modificar considerablemente los resultados ambientales de una aplicación.

En general, dentro de las aplicaciones propuestas analizadas, destaca que el porcentaje de reducción de impactos ambientales es alto, considerando que por ejemplo no se modifica los procesos constructivos.

Es importante destacar que, el proceso de evaluación ambiental de una aplicación es de suma importancia al momento de analizar el uso de nuevos materiales dentro del sector de la construcción. Esto muy ligado a que, en general, la realización de ensayos y pruebas en laboratorio y/o a escala real, implican costos elevados en la investigación, lo que se realiza antes de una evaluación ambiental.



**REFERENCIAS**

AASHTO (2011). Roadside Design Guide (4ta. ed.). American Association for State Highways and Transportation Officials. Washington, DC., USA.

ÁBACO (2018). Manual Usuario Ábaco. Recuperado de <http://abacochile.cl/> (fecha de acceso: 01-09-2021).

Abdelli, H. E., Mokrani, L., Kennouche, S., y de Aguiar, J. B. (2020). Utilization of waste glass in the improvement of concrete performance: A mini review. *Waste Management & Research*, 38(11), 1204-1213. <https://doi.org/10.1177/0734242X20941090>

Aïtcin, P. C. (2000). Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. *Cement and Concrete research*, 30(9), 1349-1359. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3)

Albuquerque, F. D. B. D., y Sicking, D. L. (2011). *Evaluation of the in-service safety performance of safety-shape and vertical concrete barriers* [Tesis doctoral, University de Nebraska].

Ali, M. B., Saidur, R., y Hossain, M. S. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252-2261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>

Alsaif, A., Koutas, L., Bernal, S. A., Guadagnini, M., y Pilakoutas, K. (2018). Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements. *Construction and Building Materials*, 172, 533-543. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.010>

Alsaif, A., Garcia, R., Figueiredo, F. P., Neocleous, K., Christofe, A., Guadagnini, M., y Pilakoutas, K. (2019). Fatigue performance of flexible steel fibre reinforced rubberised concrete pavements. *Engineering Structures*, 193, 170-183. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.040>

Amran, M., Fediuk, R., Murali, G., Avudaiappan, S., Ozbakkaloglu, T., Vatin, N., ... y Gholampour, A. (2021). Fly ash-based eco-efficient concretes: A comprehensive review of the short-term properties. *Materials*, 14(15), 4264. <https://doi.org/10.3390/ma14154264>



Aparicio, R. P., Rodríguez, L. S., y SL, S. E. (2018). Reciclado de neumáticos: transformación de un residuo en un recurso. *Revista de Plásticos Modernos*, 115(730),11-18.

Araneda, M. E. (2021). *Análisis experimental de alternativa de pavimentación sustentable utilizando asfalto reciclado en frío con emulsión asfáltica*. Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.

Ashby, M. F. (2015). *Materials and sustainable development*. Butterworth-Heinemann.

Ashby. (2020). Lecture Unit 12: Eco design and the Eco Audit tool. Grantadesign.Com. Recuperado de <https://www.grantadesign.com/teachingresources/pptecoen20/> (fecha de acceso: 01-07-2021).

Assaggaf, R. A., Ali, M. R., Al-Dulaijan, S. U., y Maslehuddin, M. (2021). Properties of concrete with untreated and treated crumb rubber–A review. *Journal of materials research and technology*, 11, 1753-1798. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.019>

Asutkar, P., Shinde, S. B., y Patel, R. (2017). Study on the behaviour of rubber aggregates concrete beams using analytical approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(1), 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.007>

Atahan, A. O., y Yücel, A. Ö. (2012). Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation. *Construction and Building Materials*, 36, 617-622. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.068>

Awolusi, T. F., Oke, O. L., Atoyebi, O. D., Akinkurolere, O. O., y Sojobi, A. O. (2021). Waste tires steel fiber in concrete: A review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00393-w>

Bachmann, K. K. W. (2007). *Gestión De Calidad: Protocolo De Terminaciones En Muros De Albañilería*. Tesis para optar al Título de Ingeniero Constructor. Universidad Austral de Chile, Chile.

Bare, J.C., Norris, G.A., Pennington, D.W. y McKone, T. (2003). TRACI: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts. *Journal of industrial ecology*, 6, 49–78. <https://doi.org/10.1162/108819802766269539>

Bare, J. (2014). *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI) TRACI version 2.1 User's Guide*. U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, DC.

Bei-Xing, L. I., Ming-xiang, C., Fang, C., y Lu-ping, L. (2004). The mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 19(3), 68-71.

Brindha, D., y Nagan, S. (2010). Utilization of copper slag as a partial replacement of fine aggregate in concrete. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 3(04), 579-585.

Bunster, V., Bustamante, W., (2020). *Inventario de materiales de construcción en Chile: Metodología y resultados*. Síntesis de Investigación N°08. Centro de Desarrollo Urbano Sustentable, Santiago. <https://doi.org/10.7764/cedeus.si.08>

Bustamante, R., Mayor, P., Rangel, C., y Hernández-Olivares, F. (2008). *Propiedades térmicas, acústicas y mecánicas de placas de mortero caucho-cemento*. Trabajo presentado en II Jornadas de Investigación en Construcción, Madrid, España. Recuperado de [https://oa.upm.es/4612/1/INVE\\_MEM\\_2008\\_61847.pdf](https://oa.upm.es/4612/1/INVE_MEM_2008_61847.pdf) (fecha de acceso: 03-07-2021).

Callister, W. D. (1995). *Introducción a la Ciencia a Ingeniería de los Materiales*. Barcelona, España: Reverté.

Carroll, J. C., y Helminger, N. (2016). Fresh and hardened properties of fiber-reinforced rubber concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016027. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001541](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001541)

Crow, J. M. (2008). The concrete conundrum. *Chemistry World*, 5(3), 62-66.

Castro Mendes, J., Barreto, R. R., de Freitas Vilaça, V., Lopes, A. V., de Souza, H. A., y Peixoto, R. A. F. (2020). Coating mortars based on mining and industrial residues. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(5), 1569-1586. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01051-0>

Cebrián, D., Garraín, D., Vidal, R., Abad, J. y París, A. *Free LCA: The use of ELCD in the design stage*. In Proceedings of the 13th International Congress on Project Engineering, Bajadoz, España, 8–10 Julio 2009.

Centonze, G., Leone, M., y Aiello, M. A. (2012). Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization. *Construction and Building Materials*, 36, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.088>

Chaikaew, C., Sukontasukkul, P., Chaisakulkiet, U., Sata, V., y Chindaprasirt, P. (2019). Properties of concrete pedestrian blocks containing crumb rubber from recycle waste tyres reinforced with steel fibres. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00304. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00304>

CINC (2020). *Generación y manejo de neumáticos fuera de uso (NFU)*. Cámara de la Industria del Neumático de Chile. Recuperado de <https://cinc.cl/wp-content/uploads/2020/07/200727-Estad%C3%ADsticas-NFU.pdf> (fecha de acceso: 14-12-2021).

Covarrubias, V., y Pablo, J. (2012). Diseño de losas de hormigón con geometría optimizada. *Revista ingeniería de construcción*, 27(3), 181-197. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732012000300005>

CPI (2020). *Escoria de acero permitiría reemplazar hasta un 60% de áridos usados en una mezcla de hormigón, reduciendo pasivos ambientales e impacto en ecosistemas fluviales*. Consejo Políticas de Infraestructura (CPI). Recuperado de <https://www.infraestructurapublica.cl/escoria-acero-permitiria-reemplazar-60-aridos-usados-una-mezcla-hormigon-reduciendo-pasivos-ambientales-e-impacto-ecosistemas-fluviales/> (fecha de acceso: 05-01-2022).

da Silva, F. M., Barbosa, L. A. G., Lintz, R. C. C., y Jacintho, A. E. P. (2015). Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber. *Construction and Building Materials*, 91, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.027>

Dávalos A. (2013). Hormigón sustentable: Una nueva mirada a los materiales de construcción. *Beauchef Magazine*, 2do semestre, 19–22.

de Solminihac, H., Bustos, M. G., Altamira, A. L., y Covarrubias, J. P. (2003). Functional distress modelling in Portland cement concrete pavements. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(4), 696-703. <https://doi.org/10.1139/103-016>

EN 15804 (2012). *Sustainability of Construction Work—Environmental Product Declarations—Core Rules for the Product Category of Construction Products*.

Eldin, N. N., y Senouci, A. B. (1993). Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal of materials in civil engineering*, 5(4), 478-496. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1993\)5:4\(478\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1993)5:4(478))

Estanqueiro, B., Dinis Silvestre, J., de Brito, J., y Duarte Pinheiro, M. (2018). Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(4), 429-449. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1197161>

Etefa, G., y Mosisa, A. (2020). Waste Rubber Tires: A Partial Replacement for Coarse Aggregate in Concrete Floor Tile Production. *American Journal of Civil Engineering*, 8(3), 57-63. [10.11648/j.ajce.20200803.12](https://doi.org/10.11648/j.ajce.20200803.12)

Falkner, H., y Henke, V. (1998). Application of steel fibre concrete for underwater concrete slabs. *Cement and Concrete Composites*, 20(5), 377-385. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00005-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00005-5)

Federacionjuntas (2018). *Las graves consecuencias que genera la excesiva extracción de áridos por falta de fiscalización*. Federación de Juntas de Vigilancia de los Ríos y Esteros. Recuperado de <https://www.federacionjuntas.cl/noticias/las-graves-consecuencias-que-genera-la-excesiva-extraccion-de-aridos-por-falta-de-fiscalizacion> (fecha de acceso: 18-01-2022).

Ferdous, W., y Manalo, A. (2014). Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies—review of current practice. *Engineering Failure Analysis*, 44, 17-35. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.04.020>

FCFC. (2018). *Colapso de Puentes: un Problema en el Manejo del Agua y de los Sedimentos*. Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. Recuperado de <http://www.forestal.uchile.cl/noticias/144771/colapso-de-puentes-un-problema-en-el-manejo-del-agua-y-sedimentos> (fecha de acceso: 20-12-2021).

Fraj, A. B., y Idir, R. (2017). Concrete based on recycled aggregates—Recycling and environmental analysis: A case study of paris' region. *Construction and Building Materials*, 157, 952-964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.059>

Frontera, P., Malara, A., y Mistretta, M. (2020, May). *Recent Trends in Sustainability Assessment of "Green Concrete"*. In International Symposium: New Metropolitan Perspectives (pp. 1402-1412). Springer, Cham.

Garces, J. I. T., Dollente, I. J., Beltran, A. B., Tan, R. R., y Promentilla, M. A. B. (2021). Life cycle assessment of self-healing geopolymers concrete. *Cleaner Engineering and Technology*, 100147. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100147>

García, E., Villa, B., Pradena, M., Urbano, B., Campos-Requena, V. H., Medina, C., y Flores, P. (2021). Experimental Evaluation of Cement Mortars with End-of-Life Tyres Exposed to Different Surface Treatments. *Crystals*, 11(5), 552. <https://doi.org/10.3390/cryst11050552>

Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., y İpek, S. (2014). Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. *Construction and Building Materials*, 63, 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046>

Gobierno Regional de Arica y Parinacota. *Nueva ley para combatir 140 mil toneladas de neumáticos en desuso*. Recuperado de <https://www.goreayp.cl/index.php/noticias/1962-nueva-ley-para-combatir-140-mil-toneladas-de-neumaticos-en-desuso> (fecha de acceso: 23-06-2021).

Graeff, A. G., Pilakoutas, K., Neocleous, K., y Peres, M. V. N. (2012). Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. *Engineering Structures*, 45, 385-395. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.030>

GreenDelta (2021). *OpenLCA*. Disponible en <http://www.openlca.org/download/> (fecha de acceso: 23-09-2021)

Guevara, J. P. (2015). *Reacondicionamiento térmico de viviendas: criterios de intervención integral*. Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Chile.

Guo, J., Huang, M., Huang, S., y Wang, S. (2019). An experimental study on mechanical and thermal insulation properties of rubberized concrete including its microstructure. *Applied Sciences*, 9(14), 2943. <https://doi.org/10.3390/app9142943>

Gursel, A. P., y Ostertag, C. (2019). Life-cycle assessment of high-strength concrete mixtures with copper slag as sand replacement. *Advances in civil engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6815348>

Hameed, A. S., y Shashikala, A. P. (2016). Suitability of rubber concrete for railway sleepers. *Perspectives in Science*, 8, 32-35. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.01.011>

Hassouna, F., y Jung, Y. W. (2020). Developing a Higher Performance and Less Thickness Concrete Pavement: Using a Nonconventional Concrete Mixture. *Advances in Civil Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8822994>

Hernández López, H., Cobo Escamilla, A., y Martínez Pérez, I. (2019). Análisis de ciclo de vida en viviendas: un caso que contrasta muro de albañilería con muro de madera en una vivienda social= Life Cycle Assessment of dwellings: a case of study that contrasts masonry wall with wood-frame wall in a social housing. *Anales de la Edificación*, 5(3), 76-91. <https://doi.org/10.20868/ade.2019.4374>.

Hooton, R. D., y Bickley, J. A. (2014). Design for durability: The key to improving concrete sustainability. *Construction and Building Materials*, 67, 422-430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.016>

Huang, X., Ge, J., Kaewunruen, S., y Su, Q. (2020). The self-sealing capacity of environmentally friendly, highly damped, fibre-reinforced concrete. *Materials*, 13(2), 298. <https://doi.org/10.3390/ma13020298>

Hsie, M., Tu, C., y Song, P. S. (2008). Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering*, 494(1-2), 153-157. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.05.037>

Ilgin, M. A., y Gupta, S. M. (2010). Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *Journal of environmental management*, 91(3), 563-591. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.09.037>

Imam, A., Kumar, V., y Srivastava, V. (2018). Review study towards effect of Silica Fume on the fresh and hardened properties of concrete. *Advances in concrete construction*, 6(2), 145. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.2.145>

Imtiaz, L., Kashif-ur-Rehman, S., Alaloul, W. S., Nazir, K., Javed, M. F., Aslam, F., y Musarat, M. A. (2021). Life Cycle Impact Assessment of Recycled Aggregate Concrete, Geopolymer Concrete, and Recycled Aggregate-Based Geopolymer Concrete. *Sustainability*, 13(24), 13515. <https://doi.org/10.3390/su132413515>

INN (1967). *Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento*. NCh158.1967. Instituto de Normalización Nacional. Santiago.

INN (2003). *Albañilería confinada – Requisitos de diseño y cálculo*. NCh2123.2003. Instituto de Normalización Nacional. Santiago.

ISO (2006). *Gestión Ambiental – Análisis del ciclo de vida – Principios y marco de referencia (ISO 14040)*. International Organization for Standardization (ISO).

Jamshidi, A., Kurumisawa, K., White, G., Nishizawa, T., Igarashi, T., Nawa, T., y Mao, J. (2019). State-of-the-art of interlocking concrete block pavement technology in Japan as a post-modern



pavement. *Construction and Building Materials*, 200, 713-755.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.286>

Kaewunruen, S., Li, D., Chen, Y., y Xiang, Z. (2018). Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber. *Materials*, 11(7), 1169.  
<https://doi.org/10.3390/ma11071169>

Karakurt, C. (2015). Microstructure properties of waste tire rubber composites: an overview. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(3), 422-433. 10.1007/s10163-014-0263-9

Karim, H. (2011). *Road Design for Future Maintenance: Life-cycle Cost Analyses for Road Barriers* [Tesis doctoral, Royal Institute of Technology (KTH)].

Kashani, A., T. D. Ngo, P. Hemachandra y A. Hajimohammadi (2018). Effects of surface treatments of recycled tyre crumb on cement-rubber bonding in concrete composite foam. *Construction and Building Materials*, 171, 467-473.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.163>

Ladiscucion (2019). *Extracción de áridos*. La Discusión. Recuperado de <http://www.ladiscucion.cl/extraccion-de-aridos-2/> (fecha de acceso: 21-12-2021).

Latawiec, R., Woyciechowski, P., y Kowalski, K. J. (2018). Sustainable concrete performance—CO2-emission. *Environments*, 5(2), 27. <https://doi.org/10.3390/environments5020027>

Lau, C. K., Chegenizadeh, A., Htut, T. N., y Nikraz, H. (2020). Performance of the steel fibre reinforced rigid concrete pavement in fatigue. *Buildings*, 10(10), 186.  
<https://doi.org/10.3390/buildings10100186>

Liew, K. M., y Akbar, A. (2020). The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 232, 117232.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117232>



Liu, F., Zheng, W., Li, L., Feng, W., y Ning, G. (2013). Mechanical and fatigue performance of rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 711-719. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.055>

Liu, F., Meng, L. Y., Ning, G. F., y Li, L. J. (2015). Fatigue performance of rubber-modified recycled aggregate concrete (RRAC) for pavement. *Construction and Building Materials*, 95, 207-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.042>

Liu, H., Wang, X., Jiao, Y., y Sha, T. (2016). Experimental investigation of the mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Materials*, 9(3), 172. <https://doi.org/10.3390/ma9030172>

Llona J. (2022). *Análisis de la Utilización de Vidrios Reciclados como Alternativa Sustentable de Reemplazo Parcial de Cemento y Áridos Finos en Hormigones*. Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Concepción, Concepción.

Mallum, I., Sam, A. R. M., Lim, N. H. A. S., y Omolayo, N. (2021). Sustainable Utilization of Waste Glass in Concrete: a Review. *Silicon*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01152-x>

Marinković, S. B., M. Malešev y I. Ignjatović (2014). Life cycle assessment (LCA) of concrete made using recycled concrete or natural aggregates. In *Eco-Efficient Construction and Building Materials* (pp. 239-266). <https://doi.org/10.1533/9780857097729.2.239>

Meesit, R., y Kaewunruen, S. (2017). Vibration characteristics of micro-engineered crumb rubber concrete for railway sleeper applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 15(2), 55-66. <https://doi.org/10.3151/jact.15.55>

Mehta, A., y Ashish, D. K. (2020). Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 29, 100888. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100888>

MINVU. (2018). *Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile. Tomo I: Salud y bienestar*. División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional - Ditec, Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). Recuperado de <https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2018/03/EST%C3%81NDARES-DE-CONSTRUCCI%C3%93N->

SUSTENTABLE-PARA-VIVIENDAS-DE-CHILE-TOMO-I-SALUD-Y-BIENESTAR.pdf

(fecha de acceso: 20-11-2021).

MMA (2016). Ley N°20920. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 01 de junio de 2016. Ministerio del Medio Ambiente (MMA).

Moenielal, M. (2006). *Concrete Block Pavements in the Port of Rotterdam*. In 8th International Conference on Concrete Block Paving. San Francisco, USA.

MOP. (2020). *Red Vial Nacional Dimensionamiento y Características*. Dirección de Vialidad Ministerio de Obras Públicas (MOP). Recuperado de <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/gestionvial/Documents/RedVialNacional2019.pdf> (fecha de acceso: 26-08-2021).

Ou, X. J., y Zhu, H. (2006). Experimental study on chloride ion permeability of Crumb Rubber Concrete. *Concrete*, 3, 46-49.

Oyarzo, J., y Peuportier, B. (2014). Life cycle assessment model applied to housing in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 69, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.090>

Palomo, Á., Fernández-Jiménez, A., López-Hombrados, C., y Lleyda, J. L. (2011). Railway sleepers made of alkali activated fly ash concrete. *Revista Ingeniería de Construcción*, 22(2), 75-80.

Pamu, Y., Kumar, V. S. S., Shakir, M. A., y Ubbana, H. (2021). Life Cycle Assessment of a building using Open-LCA software. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.621>

Parvez, A., y Foster, S. J. (2017). Fatigue of steel-fibre-reinforced concrete prestressed railway sleepers. *Engineering Structures*, 141, 241-250. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.025>

Pešta, J., Pavlů, T., Fořtová, K., y Kočí, V. (2020). Sustainable masonry made from recycled aggregates: LCA case study. *Sustainability*, 12(4), 1581. <https://doi.org/10.3390/su12041581>

- Petrella, A., Di Mundo, R., De Gisi, S., Todaro, F., Labianca, C., y Notarnicola, M. (2019). Environmentally sustainable cement composites based on end-of-life tyre rubber and recycled waste porous glass. *Materials*, 12(20), 3289. <https://doi.org/10.3390/ma12203289>
- Pham, N. P., Toumi, A., y Turatsinze, A. (2019). Effect of an enhanced rubber-cement matrix interface on freeze-thaw resistance of the cement-based composite. *Construction and Building Materials*, 207, 528-534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.147>
- Raj, A., Nagarajan, P., y Aikot Pallikkara, S. (2020). Application of Fiber-Reinforced Rubcrete for Crash Barriers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(12). 04020358. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003454
- Raj, A., Nagarajan, P., y Shashikala, A. P. (2020). Investigations on Fiber-Reinforced Rubcrete for Railway Sleepers. *ACI Structural Journal*, 117(5), 109-120. 10.14359/51724679
- Rakshvir, M., y Barai, S. V. (2006). Studies on recycled aggregates-based concrete. *Waste Management & Research*, 24(3), 225-233. <https://doi.org/10.1177/0734242X06064820>
- Ramakrishnan, V., Wu, G. Y., y Hosalli, G. (1989). Flexural fatigue strength, endurance limit and impact strength of fiber reinforced concretes. *Transportation Research Record*, 1226, 17-24.
- Rezaei, F., Bulle, C., y Lesage, P. (2019). Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages. *Building and Environment*, 153, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.034>
- Remennikov, A. M., y Kaewunruen, S. (2008). A review of loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction. *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 15(2), 207-234. <https://doi.org/10.1002/stc.227>
- Rodríguez-Miranda, S., Martínez-Álvarez, O., y González-Nava, C. (2021). Evaluación por simulación dinámica de comportamiento térmico en una casa de interés social con la incorporación

de estrategias de arquitectura bioclimática en Guanajuato, México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 22 (1). <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.1.004>

Roesler, J. R., Cervantes, V. G., y Amirkhanian, A. N. (2012). Accelerated performance testing of concrete pavement with short slabs. *International Journal of Pavement Engineering*, 13(6), 494-507. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.575134>

Rydh, C. J., Lindahl, M., y Tingström, J. (2003). *Livscykelanalys-en metod för miljöbedömning av produkter och tjänster*. Studentlitteratur, Lund, Sweden.

Saltelli, A. (2002). Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk analysis*, 22(3), 579-590. <https://doi.org/10.1111/0272-4332.00040>

Sanguinetti, C. M., y Ortiz, F. Q. (2014). Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón premezclado. Caso estudio planta productora Región del Bío Bío, Chile. *Hábitat Sustentable*, 4(2), 16–25.

Sartori, I., y Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and buildings*, 39(3), 249-257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>

Schuler, F., y Breit, W. (2021). Stahlfaserbeton—Charakterisierung von rissquerenden Fasern mittels Computer-Tomografie. *Beton-und Stahlbetonbau*, 116(6), 450-459. <https://doi.org/10.1002/best.202100016>

Shyamala, G., Kumar, K. R., y Olalusi, O. B. (2020). Impacts of nonconventional construction materials on concrete strength development: case studies. *SN Applied Sciences*, 2(11), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03687-x>

Shen, H. R., She, Y. X., y Gao, P. W. (2012). The influence of polypropylene fiber on the performance of concrete pavement. *In Applied Mechanics and Materials*, 178,1099-1103. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.178-181.1099>

Shu, X., y Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 67, 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>

SIM 2020. *EoL (End of Life) and Recycling in LCA*. Sustainability Impact Metrics (SIM). Recuperado de <https://www.ecocostsvalue.com/lca/eol-and-recycling/> (fecha de acceso: 24-10-2021).

Sjunnesson, J. (2005). *Life cycle assessment of concrete*. [Tesis de maestría, Lund University]. Lund, Sweden.

Soleimani, S. M., Alaqqad, A. R., Jumaah, A., Mohammad, N., y Faheiman, A. (2021). Incorporation of Recycled Tire Products in Pavement-Grade Concrete: An Experimental Study. *Crystals*, 11(2), 161. <https://doi.org/10.3390/cryst11020161>

Sorelli, L. G., Meda, A., y Plizzari, G. A. (2006). Steel fiber concrete slabs on ground: a structural matter. *ACI Materials Journal*, 103(4), 551.

Stephan, A., y Crawford, R. H. (2016). The relationship between house size and life cycle energy demand: Implications for energy efficiency regulations for buildings. *Energy*, 116, 1158-1171. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.038>

Suleman, M., Ahmad, N., Khan, S. U., y Ahmad, T. (2021). Investigating flexural performance of waste tires steel fibers-reinforced cement-treated mixtures for sustainable composite pavements. *Construction and Building Materials*, 275, 122099. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122099>

Teixeira, E. R., Camões, A., y Branco, F. G. (2019). Valorisation of wood fly ash on concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 292-310. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.028>

Turk, J., Cotič, Z., Mladenovič, A., y Šajna, A. (2015). Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste management*, 45, 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>

- Vogtländer, J. G. (2012). *LCA, a practical guide for students, designers and business managers*. Delft: VSSD Science and Technology. Sustainable Design Series of the Delft University of Technology
- Wang, J., Wang, Y., Sun, Y., Tingley, D. D., y Zhang, Y. (2017). Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1162-1174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.232>
- Wang, J., Dai, Q., Guo, S., y Si, R. (2019). Study on Rubberized Concrete Reinforced with Different Fibers. *ACI Materials Journal*, 116(2).
- Wang, B., Yan, L., Fu, Q., y Kasal, B. (2021). A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 171, 105565. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>
- Wang, R., Shi, Q., Li, Y., Cao, Z., y Si, Z. (2021). A critical review on the use of copper slag (CS) as a substitute constituent in concrete. *Construction and Building Materials*, 292, 123371. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123371>
- Williams, G. L. (2007). *Whole life cost-benefit analysis for median safety barriers*. Transport Research Laboratory (TRL).
- Xie, J. H., Guo, Y. C., Liu, L. S., y Xie, Z. H. (2015). Compressive and flexural behaviours of a new steel-fibre-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber. *Construction and Building materials*, 79, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.036>
- Youssf, O., Mills, J. E., Benn, T., Zhuge, Y., Ma, X., Roychand, R., y Gravina, R. (2020). Development of crumb rubber concrete for practical application in the residential construction sector—design and processing. *Construction and Building Materials*, 260, 119813. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119813>
- Zabaleta, H., y J. Egaña, (1989). *Manual del Mortero*. Instituto chileno del cemento y del hormigón. Santiago, Chile.

Zhang, Y., Luo, W., Wang, J., Wang, Y., Xu, Y., y Xiao, J. (2019). A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 209, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.078>



## Anexos

### Anexo 4.1 Resultados de impactos ambientales de cada una de las aplicaciones analizadas

A continuación, se presentan los resultados detallados que fueron mostrados gráficamente en el capítulo 4, referente a los impactos ambientales de cada una de las aplicaciones analizadas.

Tabla A.4.1 Impactos ambientales de barrera de seguridad por km lineal instalada

Categoría de Impacto	Unidad	Propuesta	Control	Ahorro
Acidificación	kg SO <sub>2</sub> eq	580.0	1511.3	61.6%
Eutroficación	kg N eq	23.6	61.3	61.5%
Calent. global	kg CO <sub>2</sub> eq	198941.5	519430.2	61.7%
Red. capa de ozono	kg CFC-11 eq	1.0.E-02	2.7 E-02	61.9%
Esmog	kg O <sub>3</sub> eq	7009.3	18196.5	61.5%
Ecotoxicidad	CTUe	13119.8	34144.5	61.6%
Efectos respiratorios	kg PM <sub>2.5</sub> eq	35.9	93.8	61.7%
Cancerígenos	CTUh	1.9 E-04	5.0 E-04	61.6%
No Cancerígenos	CTUh	1.6 E-02	4.2 E-02	61.6%

Tabla A.4.2 Variación del ahorro de impactos ambientales de la barrera de seguridad propuesta, en función de la distancia de transporte del material reciclado de NFU

Categoría de Impacto	25 km	Propuesta (250km)	500 km
Acidificación	61.8%	61.6%	61.4%
Eutroficación	61.8%	61.5%	61.2%
Calent. global	61.8%	61.7%	61.6%
Red. capa de ozono	61.9%	61.9%	61.9%
Esmog	61.9%	61.5%	61.0%
Ecotoxicidad	61.6%	61.6%	61.5%
Efectos respiratorios	61.8%	61.7%	61.5%
Cancerígenos	61.7%	61.6%	61.6%
No Cancerígenos	61.6%	61.6%	61.6%



Tabla A.4.3 Variación del ahorro de impactos ambientales de la barrera de seguridad propuesta, en función de la mejora en la vida útil

Categoría de Impacto	Porcentaje de mejora de la vida útil			
	50%	100%	Propuesta (160%)	220%
Acidificación	33%	50%	62%	69%
Eutroficación	33%	50%	62%	69%
Calent. global	34%	50%	62%	69%
Red. capa de ozono	34%	50%	62%	69%
Esmog	33%	50%	61%	69%
Ecotoxicidad	33%	50%	62%	69%
Efectos respiratorios	34%	50%	62%	69%
Cancerígenos	33%	50%	62%	69%
No Cancerígenos	33%	50%	62%	69%

Tabla A.4.4 Impactos ambientales del durmiente de ferrocarril por km lineal instalado

Categoría de impacto	Unidad	Propuesta	Control	Ahorro
Acidificación	kg SO <sub>2</sub> eq	201.4	405.1	50.3%
Eutroficación	kg N eq	8.2	16.5	50.2%
Calent. global	kg CO <sub>2</sub> eq	65256.6	131413.9	50.3%
Red. capa de ozono	kg CFC-11 eq	3.6 E-03	7.2 E-03	50.5%
Esmog	kg O <sub>3</sub> eq	2646.3	5312.8	50.2%
Ecotoxicidad	CTUe	3148.4	6313.5	50.1%
Efectos respiratorios	kg PM <sub>2.5</sub> eq	11.4	23.0	50.3%
Cancerígenos	CTUh	5.0 E-05	1.0 E-04	50.2%
No Cancerígenos	CTUh	3.9 E-03	7.7 E-03	50.2%

Tabla A.4.5 Variación del ahorro de impactos ambientales del durmiente de ferrocarril propuesto, en función de la distancia de transporte del material reciclado de NFU

Categoría de impacto	25 km	Propuesta (250km)	500 km
Acidificación	50%	50%	50%
Eutroficación	51%	50%	50%
Calent. global	50%	50%	50%
Red. capa de ozono	51%	51%	50%
Esmog	51%	50%	50%
Ecotoxicidad	50%	50%	50%
Efectos respiratorios	50%	50%	50%
Cancerígenos	50%	50%	50%
No Cancerígenos	50%	50%	50%

Tabla A.4.6 Variación del ahorro de impactos ambientales del durmiente de ferrocarril propuesto, en función de la mejora en la vida útil

Categoría de impacto	Porcentaje de mejora de la vida útil		
	50%	Propuesta (100%)	220%
Acidificación	34%	50%	55%
Eutroficación	34%	50%	55%
Calent. global	34%	50%	55%
Red. capa de ozono	34%	51%	55%
Esmog	34%	50%	55%
Ecotoxicidad	34%	50%	55%
Efectos respiratorios	34%	50%	55%
Cancerígenos	34%	50%	55%
No Cancerígenos	34%	50%	55%

Tabla A.4.7 Impactos ambientales de la vivienda analizada considerando el consumo energético para calefacción/enfriamiento

Categoría de impacto	Unidad	Propuesta	Control	Ahorro
Acidificación	kg SO <sub>2</sub> eq	263.2	286.9	8%
Eutroficación	kg N eq	8.4	9.2	8%
Calent. global	kg CO <sub>2</sub> eq	103269.4	112594.5	8%
Red. capa de ozono	kg CFC-11 eq	2.8 E-04	2.8 E-04	0.4%
Esmog	kg O <sub>3</sub> eq	2298.0	2499.2	8%
Ecotoxicidad	CTUe	2431.9	2653.8	8%
Efectos respiratorios	kg PM <sub>2.5</sub> eq	16.4	17.9	8%
Cancerígenos	CTUh	4.7 E-05	5.1 E-05	8%
No Cancerígenos	CTUh	2.2 E-03	2.4 E-03	8%

Tabla A.4.8 Variación del ahorro de impactos ambientales de la vivienda analizada con el mortero propuesto, en función de la distancia de transporte del caucho reciclado de NFU

Categoría de impacto	25 km	Propuesta (250 km)	500 km
Acidificación	8%	8%	8%
Eutroficación	8%	8%	8%
Calent. global	8%	8%	8%
Red. capa de ozono	0%	0%	0%
Esmog	8%	8%	8%
Ecotoxicidad	8%	8%	8%
Efectos respiratorios	8%	8%	8%
Cancerígenos	8%	8%	8%
No Cancerígenos	8%	8%	8%

Tabla A.4.9 Variación del ahorro de impactos ambientales de la vivienda analizada con el mortero propuesto, en función de la mejora el nivel de ahorro energético

Categoría de impacto	Variación del porcentaje de ahorro energético		
	5%	Propuesta (8.6%)	15%
Acidificación	5%	8%	15%
Eutroficación	5%	8%	14%
Calent. global	5%	8%	15%
Red. capa de ozono	-2%	0%	5%
Esmog	4%	8%	14%
Ecotoxicidad	5%	8%	15%
Efectos respiratorios	5%	8%	15%
Cancerígenos	5%	8%	15%
No Cancerígenos	5%	8%	14%

Tabla A.4.10 Impactos ambientales de la vivienda analizada considerando el consumo energético para calefacción/enfriamiento (mortero de mayor resistencia)

Categoría de impacto	Unidad	Propuesta	Control	Ahorro
Acidificación	kg SO <sub>2</sub> eq	265.6	287.6	7.7%
Eutroficación	kg N eq	8.5	9.2	7.5%
Calent. global	kg CO <sub>2</sub> eq	104128.5	112848.5	7.7%
Red. capa de ozono	kg CFC-11 eq	3.4 E-04	3.0 E-04	-11.9%
Esmog	kg O <sub>3</sub> eq	2329.0	2509.0	7.2%
Ecotoxicidad	CTUe	2447.6	2658.5	7.9%
Efectos respiratorios	kg PM <sub>2.5</sub> eq	16.5	17.9	7.8%
Cancerígenos	CTUh	4.7 E-05	5.1 E-05	7.7%
No Cancerígenos	CTUh	2.2 E-03	2.4 E-03	7.4%

Tabla A.4.11 Variación del ahorro de impactos ambientales de la vivienda analizada con el mortero propuesto, en función de la distancia de transporte del caucho reciclado de NFU (mortero de mayor resistencia)

Categoría de impacto	25 km	Propuesta (250 km)	500 km
Acidificación	8%	8%	8%
Eutroficación	8%	8%	7%
Calent. global	8%	8%	8%
Red. capa de ozono	-12%	-12%	-12%
Esmog	7%	7%	7%
Ecotoxicidad	8%	8%	8%
Efectos respiratorios	8%	8%	8%
Cancerígenos	8%	8%	8%
No Cancerígenos	7%	7%	7%

Tabla A.4.12 Variación del ahorro de impactos ambientales de la vivienda analizada con el mortero propuesto, en función de la mejora el nivel de ahorro energético (mortero de mayor resistencia)

Categoría de impacto	Variación del porcentaje de ahorro energético		
	5%	Propuesta (8.6%)	15%
Acidificación	4%	8%	14%
Eutroficación	4%	8%	14%
Calent. global	4%	8%	14%
Red. capa de ozono	-14%	-12%	-8%
Esmog	4%	7%	13%
Ecotoxicidad	4%	8%	14%
Efectos respiratorios	4%	8%	14%
Cancerígenos	4%	8%	14%
No Cancerígenos	4%	7%	14%

Tabla A.4.13 Impactos ambientales del pavimento por km lineal

Categoría de impacto	Unidad	Propuesta	Control	Ahorro
Acidificación	kg SO <sub>2</sub> eq	723.6	760.5	4.9%
Eutroficación	kg N eq	26.6	27.8	4.3%
Calent. global	kg CO <sub>2</sub> eq	236554.3	249801.1	5.3%
Red. capa de ozono	kg CFC-11 eq	1.5 E-02	1.6 E-02	6.4%
Esmog	kg O <sub>3</sub> eq	9307.3	9693.8	4.0%
Ecotoxicidad	CTUe	4872.3	5132.6	5.1%
Efectos respiratorios	kg PM <sub>2.5</sub> eq	37.0	39.4	6.2%
Cancerígenos	CTUh	1.1 E-04	1.2 E-04	5.3%
No Cancerígenos	CTUh	6.5 E-03	6.9 E-03	5.7%

Tabla A.4.14 Variación del ahorro de impactos ambientales del pavimento propuesto, en función de la distancia de transporte del material reciclado de NFU

Categoría de impacto	25 km	Propuesta (250 km)	500 km
Acidificación	6.9%	4.9%	2.6%
Eutroficación	7.6%	4.3%	0.6%
Calent. global	6.3%	5.3%	4.2%
Red. capa de ozono	6.4%	6.4%	6.4%
Esmog	7.5%	4.0%	0.0%
Ecotoxicidad	6.6%	5.1%	3.3%
Efectos respiratorios	7.9%	6.2%	4.4%
Cancerígenos	6.4%	5.3%	4.1%
No Cancerígenos	5.8%	5.7%	5.5%

Tabla A.4.15 Variación del ahorro de impactos ambientales del pavimento propuesto, en función de la disminución del espesor

Categoría de impacto	Variación del espesor del pavimento			
	2.5%	Propuesta (5%)	10%	26%
Acidificación	2.4%	5%	13.5%	24.5%
Eutroficación	1.8%	4%	13.0%	24.0%
Calent. global	2.9%	5%	13.9%	24.8%
Red. capa de ozono	4.0%	6%	14.9%	25.7%
Esmog	1.5%	4%	12.7%	23.8%
Ecotoxicidad	2.6%	5%	13.7%	24.7%
Efectos respiratorios	3.8%	6%	14.7%	25.6%
Cancerígenos	2.9%	5%	13.9%	24.8%
No Cancerígenos	3.3%	6%	14.2%	25.1%

