



**UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN**
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
INGENIERÍA CIVIL
SEDE CONCEPCIÓN**

**REDUCCIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES EN PAVIMENTOS Y
RECAPADOS DE HORMIGÓN DEBIDO A LA INCORPORACIÓN DE
FIBRAS METÁLICAS**

Tesis para optar al Título en Ingeniería Civil

Profesor tutor: Dr. Mauricio Pradena Miquel

Estudiante: Magdalena Pavez Van Rysselberghe

© Magdalena Pavez Van Rysselberghe. Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

Concepción, Chile

2024

HOJA DE CALIFICACIÓN

En _____, el ____ de _____ de _____ los abajo
firmantes dejan constancia que el (la) estudiante _____
de la carrera de _____ ha aprobado la tesis para optar al título
de _____ con nota de

Profesor Evaluador

Profesor Evaluador

Profesor Evaluador

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia y amigos, por su constante apoyo y por inspirarme a seguir mejorando cada día.

Dedicado también a Sebastián por su constante cariño y su apoyo incondicional a lo largo de este camino.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mis agradecimientos al profesor guía, Dr. Mauricio Pradena, por su invaluable apoyo, dedicación y compromiso, los que fueron pilares fundamentales en el desarrollo de la investigación.

Extiendo mi gratitud a Andrés César Torres por su constante disposición y prontitud para ofrecer su ayuda. Del mismo modo, agradezco a Nicol Ávila por su colaboración, interés y dedicación durante el análisis de los resultados.

Finalmente, deseo agradecer a Javiera Padilla por su respaldo incondicional, su compañía a lo largo de este proceso, y su valiosa contribución en las áreas de su especialidad.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. MOTIVACIÓN.....	3
1.2. OBJETIVOS	5
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	5
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.3. ESTADO DEL ARTE	6
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	9
2.1. INTRODUCCIÓN	9
2.2. CASOS DE ESTUDIO.....	9
2.3. PARÁMETROS CONSIDERADOS	12
2.3.1. VARIABLES INDEPENDIENTES	12
2.3.2. VARIABLES DEPENDIENTES	13
2.4. RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN EN EL HORMIGÓN.....	14
2.4.1. RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN CON FIBRAS COMERCIALES	14
2.4.2. RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN EN FIBRAS RECICLADAS.....	16
2.5. DISEÑO DE PAVIMENTOS	16
2.6. DISEÑO DE RECAPADOS	18
2.7. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA.....	20
2.8. SOFTWARE OPENLCA.....	25
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	26
3.1. INTRODUCCIÓN	26
3.2. RESULTADOS EN DISEÑO DE PAVIMENTOS	26
3.3. RESULTADOS EN DISEÑO DE RECAPADOS	32
3.4. RESULTADOS ANÁLISIS CICLO DE VIDA.....	37
3.4.1. ACV DE PAVIMENTOS PARA 20 MILLONES DE EJES EQUIVALENTES.....	37
3.4.2. ACV DE PAVIMENTOS PARA 60 MILLONES DE EJES EQUIVALENTES.....	41
3.4.3. ACV DE RECAPADOS PARA 20 MILLONES DE EJES EQUIVALENTES	44

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	47
ANEXO 1. DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	51
ANEXO 2. DISEÑO DE RECAPADOS	54
ANEXO 3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS PARA 20 MILLONES EE	55
ANEXO 4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS PARA 60 MILLONES EE	59
ANEXO 5. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA RECAPADOS.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CICLOS DE RECICLAJE.....	7
FIGURA 2. UBICACIÓN CIUDADES DE ESTUDIO	10
FIGURA 3. VARIABLES EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS	10
FIGURA 4. VARIABLES DE DISEÑO DE RECAPADOS.....	11
FIGURA 5. CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO	20
FIGURA 6. FASES DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	22
FIGURA 7. STREAMLINED LIFE CYCLE ASSESSMENT	24
FIGURA 8. ESPESORES DE LOSA EN CONCEPCIÓN	27
FIGURA 9. ESPESORES DE LOSA EN TEMUCO	28
FIGURA 10. ESPESORES DE LOSA EN VALDIVIA	29
FIGURA 11. ESPESORES DE LOSA EN PUNTA ARENAS.....	30
FIGURA 12. ESPESOR DE RECAPADOS EN CONCEPCIÓN	33
FIGURA 13. ESPESORES DE RECAPADOS EN TEMUCO	34
FIGURA 14. ESPESORES DE RECAPADOS EN VALDIVIA	35
FIGURA 15. ESPESORES DE LOSA EN PUNTA ARENAS	36
FIGURA 16. IMPACTOS EN CONCEPCIÓN PARA 20 MILLONES DE EE	38
FIGURA 17. IMPACTOS EN TEMUCO PARA 20 MILLONES DE EE	38
FIGURA 18. IMPACTOS EN VALDIVIA PARA 20 MILLONES DE EE	39
FIGURA 19. IMPACTOS EN PUNTA ARENAS PARA 20 MILLONES DE EE	39
FIGURA 20. IMPACTOS EN CONCEPCIÓN PARA 60 MILLONES DE EE	41
FIGURA 21. IMPACTOS EN TEMUCO PARA 60 MILLONES DE EE	42
FIGURA 22. IMPACTOS EN VALDIVIA PARA 60 MILLONES DE EE	42
FIGURA 23. IMPACTOS EN PUNTA ARENAS PARA 60 MILLONES DE EE	43
FIGURA 24. IMPACTOS EN RECAPADOS EN CONCEPCIÓN.....	44
FIGURA 25. IMPACTOS DE RECAPADOS EN TEMUCO.....	45
FIGURA 26. IMPACTOS EN RECAPADOS EN PUNTA ARENAS	45

FIGURA 27. IMPACTOS EN RECAPADOS EN VALDIVIA.....	46
FIGURA 28. RESUMEN DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS	51
FIGURA 29. VERIFICACIÓN POR ESCALONAMIENTO.....	52
FIGURA 30. VERIFICACIÓN POR CARGA DE ESQUINA	53
FIGURA 31. ILUSTRACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE RECAPADOS	54
FIGURA 32. DOSIFICACIONES PARA PAVIMENTOS EN CONCEPCIÓN	55
FIGURA 33. IMPACTOS AMBIENTALES DE RECAPADOS EN PUNTA ARENAS	65

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.	VARIABLES INDEPENDIENTES	13
TABLA 2.	VARIABLES DEPENDIENTES DE CONDICIONES DE CLIMA.....	13
TABLA 3.	VARIABLES DEPENDIENTES DEL TRÁFICO.....	14
TABLA 4.	OBJETIVOS Y ALCANCES DEL SISTEMA DE ESTUDIO	23
TABLA 5.	ESPEORES DE LOSA EN CONCEPCIÓN.....	27
TABLA 6.	ESPEORES DE LOSA EN TEMUCO.....	28
TABLA 7.	ESPEORES DE LOSA EN VALDIVIA.....	29
TABLA 8.	ESPEORES DE LOSA EN PUNTA ARENAS	30
TABLA 9.	ESPESOR DE RECAPADOS EN CONCEPCIÓN	32
TABLA 10.	ESPESOR DE RECAPADO EN TEMUCO	33
TABLA 11.	ESPESOR DE RECAPADOS EN VALDIVIA.....	34
TABLA 12.	ESPESOR DE RECAPADOS EN PUNTA ARENAS	35
TABLA 13.	IMPACTOS EN CONCEPCIÓN PARA 20 MILLONES EE	55
TABLA 14.	IMPACTOS EN CONCEPCIÓN EN % PARA 20 MILLONES EE.....	55
TABLA 15.	IMPACTOS EN TEMUCO PARA 20 MILLONES EE.....	56
TABLA 16.	IMPACTOS EN TEMUCO EN % PARA 20 MILLONES EE	56
TABLA 17.	DOSIFICACIONES PARA PAVIMENTOS EN TEMUCO.....	56
TABLA 18.	IMPACTOS EN VALDIVIA PARA 20 MILLONES EE	57
TABLA 19.	IMPACTOS EN VALDIVIA EN % PARA 20 MILLONES EE.....	57
TABLA 20.	DOSIFICACIONES PARA PAVIMENTOS EN VALDIVIA.....	57
TABLA 21.	IMPACTOS EN PUNTA ARENAS PARA 20 MILLONES EE	58
TABLA 22.	IMPACTOS EN PUNTA ARENAS EN % PARA 20 MILLONES EE	58
TABLA 23.	DOSIFICACIONES PARA PAVIMENTOS EN PUNTA ARENAS	58
TABLA 24.	IMPACTOS EN CONCEPCIÓN PARA 60 MILLONES EE	59
TABLA 25.	IMPACTOS EN CONCEPCIÓN EN % PARA 60 MILLONES EE.....	59
TABLA 26.	DOSIFICACIÓN PARA CONCEPCIÓN	59

TABLA 27.	IMPACTOS EN TEMUCO PARA 60 MILLONES DE EE.....	60
TABLA 28.	IMPACTOS EN TEMUCO EN % PARA 60 MILLONES EE	60
TABLA 29.	DOSIFICACIÓN EN TEMUCO.....	60
TABLA 30.	IMPACTOS EN VALDIVIA PARA 60 MILLONES EE	61
TABLA 31.	IMPACTOS EN VALDIVIA EN % PARA 60 MILLONES EE.....	61
TABLA 32.	DOSIFICACIÓN EN VALDIVIA.....	61
TABLA 33.	IMPACTOS EN PUNTA ARENAS PARA 60 MILLONES EE	62
TABLA 34.	IMPACTOS EN PUNTA ARENAS EN % PARA 60 MILLONES EE	62
TABLA 35.	DOSIFICACIÓN EN PUNTA ARENAS	62
TABLA 36.	IMPACTOS AMBIENTALES DE RECAPADOS EN CONCEPCIÓN.....	63
TABLA 37.	IMPACTOS AMBIENTALES EN % DE RECAPADOS EN CONCEPCIÓN	63
TABLA 38.	DOSIFICACIÓN DE RECAPADOS EN CONCEPCIÓN	63
TABLA 39.	IMPACTOS AMBIENTALES DE RECAPADOS EN VALDIVIA.....	64
TABLA 40.	IMPACTOS AMBIENTALES EN % DE RECAPADOS EN VALDIVIA	64
TABLA 41.	DOSIFICACIÓN DE RECAPADOS EN VALDIVIA.....	64
TABLA 42.	IMPACTOS AMBIENTALES EN % EN PUNTA ARENAS.....	65
TABLA 43.	DOSIFICACIÓN DE RECAPADOS EN PUNTA ARENAS	65
TABLA 44.	IMPACTOS AMBIENTALES EN RECAPADOS EN TEMUCO	66
TABLA 45.	IMPACTOS AMBIENTALES EN % EN TEMUCO	66
TABLA 46.	DOSIFICACIÓN EN TEMUCO.....	66

RESUMEN

La industria de la construcción es responsable del 37% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, de las cuales un 10% corresponde a la fabricación de materiales. En este contexto, la producción de cemento representa aproximadamente el 7% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial.

La presente investigación tiene como objetivo analizar la reducción de los impactos ambientales en pavimentos y recapados de hormigón mediante la incorporación de fibras metálicas. Las fibras utilizadas incluyen las de origen comercial, fibras recicladas a partir de neumáticos fuera de uso (NFU) y fibras recicladas a partir de desechos provenientes del procesamiento de piezas de acero (PPA).

Con el fin de alcanzar el objetivo, se realiza una revisión bibliográfica que evidencia que la adición de fibras metálicas, ya sean comerciales o recicladas, no solo mejora el desempeño estructural de los pavimentos y recapados, sino que también permite una reducción del espesor de las losas y, en consecuencia, del consumo de materiales. Este beneficio se atribuye al aumento de la resistencia a la flexocompresión del hormigón modificado: en un 43% al incorporar fibras comerciales, un 2% con fibras NFU y un 7% con fibras PPA.

Los resultados obtenidos en los diversos casos de estudio, realizados en distintas ciudades de Chile, bajo diferentes condiciones de tráfico, demuestran que el uso de fibras metálicas optimiza el diseño de pavimentos y recapados, lo que conlleva a una reducción del impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de estas estructuras. En el caso de Valdivia, la incorporación de fibras comerciales permitió una reducción de los espesores de losa de 18% aproximadamente. Esto implicó una reducción en las emisiones asociadas al cemento, pasando de 1,314E5 kgCO₂eq a 1,07E5 kgCO₂eq.

Por su parte, en Concepción, el uso de fibras metálicas permitió la reducción del espesor de losa en un 28% aproximadamente. Esto implicó una reducción de los impactos asociados al cemento, pasando de 1,68E5 kgCO₂eq a 1,41E5 kgCO₂eq.

Estas diferencias en los porcentajes de reducción entre ambas ciudades pueden atribuirse principalmente a las variaciones en las condiciones climáticas locales, en particular al efecto del viento. Este factor incide significativamente en el diferencial de temperatura, un elemento clave que influye directamente en los espesores necesarios en cada pavimento.

Por otro lado, este enfoque contribuye a una mayor durabilidad y resistencia del hormigón frente a cargas pesadas y repetitivas, al tiempo que fomenta prácticas sostenibles mediante la incorporación de materiales reciclados, en línea con los principios de la economía circular.

Por último, para evaluar el efecto de esta tecnología, se evaluaron 80 casos de estudio para pavimentos y 80 para recapados, confirmando la efectividad de esta tecnología en términos ambientales y estructurales.

ABSTRACT

The construction industry is responsible for 37% of global greenhouse gas emissions, with 10% attributed to the production of materials. In this context, cement production accounts for approximately 7% of global greenhouse gas emissions.

This research aims to analyze the reduction of environmental impacts in concrete pavements and overlays through the incorporation of metallic fibers. The fibers utilized include commercially manufactured fibers, fibers recycled from end-of-life tires (ELTs), and fibers recycled from steel-processing waste (SPW).

To achieve this objective, a literature review was conducted, revealing that the addition of metallic fibers, whether commercial or recycled, not only enhances the structural performance of pavements and overlays but also enables a reduction in slab thickness and, consequently, material consumption. This benefit is attributed to the increased flexural-compressive strength of modified concrete: a 43% improvement with commercial fibers, a 2% improvement with ELTs fibers, and a 7% improvement with SPW fibers.

The results obtained from various case studies conducted in different cities across Chile, under varying traffic conditions, demonstrate that the use of metallic fibers optimizes the design of pavements and overlays. This optimization results in a reduction of the environmental impact throughout the life cycle of these structures. In Valdivia, for instance, the incorporation of commercial fibers enabled an approximate 18% reduction in slab thickness, leading to a decrease in cement-related emissions from 1,314E5 kgCO₂eq to 1,07E5 kgCO₂eq.

Similarly, in Concepción, the use of metallic fibers allowed for an approximate 28% reduction in slab thickness, resulting in a decrease in cement-related emissions from 1,68E5 kgCO₂eq to 1,41E5 kgCO₂eq.

The differences in reduction percentages between these cities can be primarily attributed to variations in local climatic conditions, particularly the effect of wind. This factor significantly influences the temperature differential, a key element directly impacting the required slab thickness for each pavement.

Moreover, this approach contributes to greater durability and resistance of concrete against heavy and repetitive loads, while promoting sustainable practices through the incorporation of recycled materials, aligning with the principles of circular economy.

Finally, to assess the efficacy of this technology, 80 case studies were evaluated for pavements and another 80 for overlays, confirming its effectiveness in both environmental and structural terms.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

La industria de la construcción representa una de las mayores fuentes de impacto ambiental, debido a que es responsable del 37% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, de las cuales el 10% provienen de la construcción de materiales (UNECE, 2022). Este impacto abarca tanto la construcción de nuevas infraestructuras como la reparación y el mantenimiento de las existentes.

Entre los componentes fundamentales de esta industria se encuentran los pavimentos, que resultan esenciales para el desarrollo económico y social, pues facilitan la conectividad, el transporte de bienes y servicios y la movilidad de las personas. Existen diferentes tipos de pavimentos, como los pavimentos rígidos, elaborados principalmente de hormigón, y los pavimentos flexibles, que se constituyen con capas de materiales granulares y asfalto. Cada tipo presenta ventajas y desventajas en términos de durabilidad, costo y mantenimiento, por lo que su elección dependerá de las necesidades específicas del proyecto (Huang et al. 2018).

Para resistir las exigencias del tráfico y garantizar su funcionalidad, los pavimentos, ya sean rígidos o flexibles, deben ser duraderos y eficientes. En este sentido, los pavimentos de hormigón presentan ventajas significativas sobre los de asfalto, tales como mayor rigidez y resistencia a la deformación (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1993). Estas características mejoran la durabilidad y reducen la necesidad de mantenimiento. Esto es particularmente relevante en las aplicaciones con cargas lentas y repetitivas, como es el caso de los corredores de buses, donde los pavimentos de hormigón han demostrado ser la solución óptima por su capacidad de soportar cargas prolongadas (IECA,2024).

A pesar de su utilidad e importancia, la fabricación, construcción y mantenimiento de los pavimentos rígidos generan un impacto ambiental considerable, vinculado principalmente al consumo de materiales y energía, así como las emisiones de gases de efecto invernadero vinculado a su ciclo de vida. El cemento, compuesto principal en las mezclas

de hormigón es responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones globales de Dióxido de Carbono (CO_2) (UNECE, 2022). Para mitigar este problema ambiental, una solución prometedora es la inclusión de fibras metálicas en la mezcla de hormigón, lo que no solo mejora la resistencia a la flexotracción y reduce el agrietamiento, sino que también permite optimizar el diseño estructural de los pavimentos (Cuenca Asencio, 2021).

Por otro lado, los recapados de hormigón constituyen una solución efectiva para extender la vida útil de los pavimentos, rígidos o flexibles, evitando la necesidad de una reconstrucción completa. Esta técnica se basa en la aplicación de una capa de hormigón sobre una estructura existente, lo que permite restaurar sus propiedades funcionales y estructurales. Al reutilizar la base del pavimento, en este caso de hormigón, se disminuye el consumo de materiales vírgenes y se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero asociados con la fabricación, transporte y disposición final de los materiales (Nacional Concrete Pavement Technology Center, 2007).

Además, si los recapados incorporan fibras metálicas en sus mezclas, los beneficios ambientales podrían ser aún mayores, pues las fibras pueden mejorar la resistencia y durabilidad del material, reduciendo aún más la necesidad de reparaciones frecuentes y prolongando la vida útil del pavimento.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la reducción de impactos ambientales en pavimentos y recapados de hormigón debido a la incorporación de fibras metálicas comerciales y recicladas.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar cambios en las propiedades mecánicas del hormigón debido a la incorporación de fibras metálicas comerciales y recicladas.
- Analizar la reducción de espesores en losas de pavimentos y recapados de hormigón debido a la incorporación de fibras metálicas comerciales y recicladas.
- Comparar los impactos ambientales de pavimentos y recapados de hormigón con o sin fibras metálicas.

1.3. ESTADO DEL ARTE

En la construcción, los pavimentos y recapados de hormigón constituyen elementos esenciales para garantizar infraestructuras seguras y duraderas. Sin embargo, su fabricación y mantenimiento generan un impacto ambiental considerable, derivado al alto consumo de materiales y la generación de residuos. En este contexto, el uso de hormigón reforzado con fibras surge como una solución innovadora que ofrece beneficios tanto estructurales como ambientales.

Las fibras incorporadas en el hormigón pueden ser de diversos materiales, como acero o polipropileno, contribuyendo en ambos casos a mejorar significativamente las propiedades mecánicas y la durabilidad del material. Las fibras metálicas, especialmente las de acero, aumentan notablemente la resistencia a la flexión, tracción y desgaste, lo que prolonga la vida útil de la estructura y reduce la necesidad de mantenimiento (Altoubat et al., 2008). Por su parte, las fibras de polipropileno se emplean principalmente para reforzar la distribución de tensiones dentro del hormigón, minimizando la aparición de grietas y mejorando la estabilidad de las estructuras (Fibras y Mallas, 2019).

En el caso de pavimentos rígidos, el uso de fibras metálicas ha demostrado ser especialmente beneficioso, ya que permite controlar la propagación de grietas y reducir el espesor de las losas de hormigón sin comprometer su resistencia estructural (Cuenca Asencio, 2021). Esta estrategia no solo representa un ahorro en materiales, sino también reduce el impacto ambiental de las obras (Javaid et al., 2020). Cuando las fibras utilizadas son recicladas, como las obtenidas de neumáticos fuera de uso (NFU) o desechos del procesamiento de piezas de acero (PPA), el impacto ambiental es aún menor, dado a que el proceso de reciclaje requiere únicamente ajustes para la reutilización del material (Vogtländer, 2023), concepto el cual se explica de manera esquemática en la figura 1. Así, las fibras recicladas no solo mejoran las propiedades mecánicas del hormigón, sino que también promueven la economía circular y la sostenibilidad en la industria del hormigón.

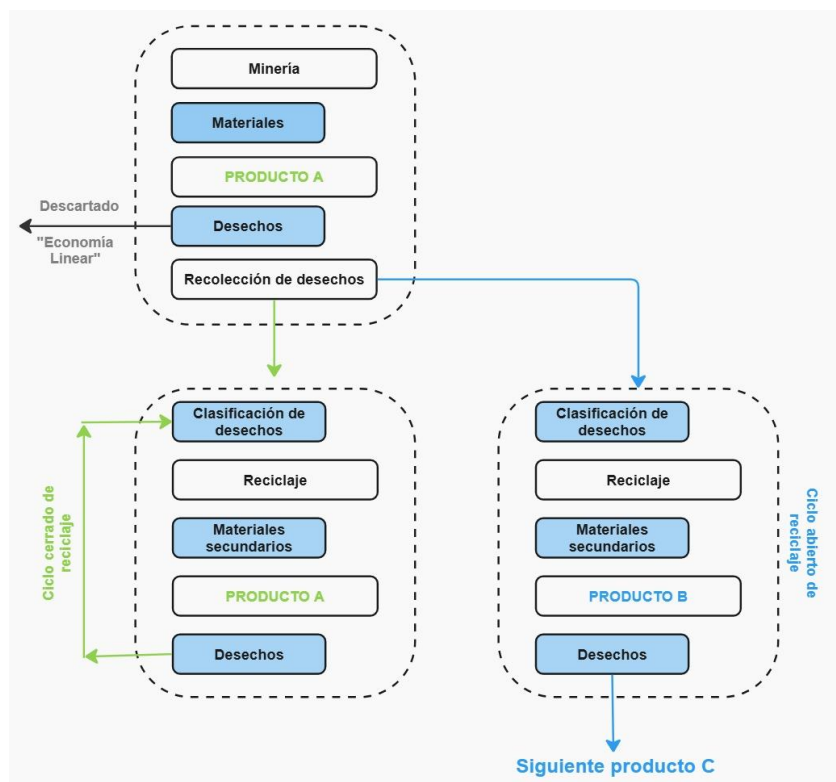


Figura 1. Ciclos de reciclaje
Fuente: Adaptación de Vogtländer (2023)

Más allá de los pavimentos, la incorporación de fibras también ha demostrado ser beneficiosa en otras áreas de la construcción, como es el caso de los muros prefabricados. En estos, las fibras de polipropileno se emplean para reforzar las mezclas de hormigón, proporcionando una barrera adicional contra la humedad, aumentando así la durabilidad de las estructuras, al tiempo que reducen la cantidad de armadura necesaria, lo que trae consigo un beneficio ambiental (Fibras y Mallas, 2019).

Respecto a los pavimentos, las fibras de polipropileno actúan como un refuerzo que mitiga los efectos de las variaciones térmicas y los impactos mecánicos. Este refuerzo da lugar a una mayor uniformidad en la distribución de tensiones, lo que se traduce en una mejora de la resistencia y una reducción de los costos de mantenimiento a largo plazo (Arequipa, 2023).

A pesar de la amplia gama de aplicaciones de las fibras en la construcción, el foco de esta investigación se encuentra en los efectos específicos de las fibras metálicas en

pavimentos rígidos. Este enfoque permite analizar cómo las fibras contribuyen a mejorar las propiedades mecánicas del hormigón, reduciendo el impacto ambiental y favoreciendo el uso de materiales reciclados dentro de un modelo de economía circular.

La durabilidad de las infraestructuras es fundamental en el desarrollo sostenible, dado a que estructuras más duraderas requieren menos intervenciones, lo que reduce el uso de materiales, costos económicos, consumo de energía y emisiones de contaminantes. En este sentido, los pavimentos de hormigón resaltan sobre el resto, debido a su alta durabilidad, especialmente cuando se tratan de grandes cargas.

La incorporación de fibras ha demostrado ser una solución efectiva para mejorar la resistencia mecánica del material, particularmente la tracción y flexión, aspectos esenciales para pavimentos expuestos a altas solicitaciones. Estas fibras contribuyen a reducir el agrietamiento y aumentar la tenacidad del pavimento, lo que permite la reducción del espesor y a una disminución en las emisiones y consumo de energía (Blanco, 2016).

El desafío en la construcción de los pavimentos de hormigón radica en encontrar un equilibrio entre la reducción del espesor y el aumento en la durabilidad, con el fin de mejorar la sostenibilidad de la red vial o aeroportuaria y garantizar un desempeño adecuado bajo cargas intensas. En el caso de los pavimentos aeroportuarios, las fibras metálicas surgen como una alternativa atractiva con el potencial de afrontar estos desafíos (Jamieson et al., 2024). Esta estrategia no solo prolongaría la vida útil de los pavimentos en aeropuertos, sino que también contribuirá a la reducción del impacto ambiental y social asociado a la construcción y el mantenimiento de este tipo de infraestructura.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone la metodología empleada para el desarrollo de la investigación, abordando los distintos casos de estudio, los parámetros considerados, el método de diseño utilizado para el cálculo de espesores de losa y de recapados, y, por último, la metodología aplicada para el análisis del impacto ambiental.

2.2. CASOS DE ESTUDIO

Para cumplir con los objetivos de la investigación, se definieron diversos casos de tráfico, los que abarcan desde los 20 a los 60 millones de ejes equivalentes, en intervalos de 10 millones. En cada uno de estos escenarios, se evaluó el comportamiento sin uso de fibras y el comportamiento usando tres tipos de fibras metálicas diferentes: (1) fibras vírgenes o comerciales, (2) fibras recicladas a partir de NFU y (3) fibras recicladas a partir de PPA.

Se seleccionaron cuatro ciudades: Concepción, Temuco, Valdivia y Punta Arenas, cuya ubicación se ilustra en la figura 2. La elección de estas ciudades responde a su diversidad geográfica y climática, lo que proporciona una amplia variedad de condiciones para el análisis del comportamiento de los pavimentos y recapados de hormigón reforzados con fibras metálicas. Este enfoque permite considerar cómo las diferentes condiciones climáticas influyen en el desempeño del pavimento, aspecto que es clave en el método utilizado (AASHTO- MOP).



Figura 2. Ubicación ciudades de estudio

Fuente: Google Maps (2024)

Considerando estas variables (escenarios de tráfico, tipo de fibra y ubicación geográfica), el diseño de pavimentos abarca un total de 80 combinaciones posibles, cuyas variables se resumen en la figura 3.

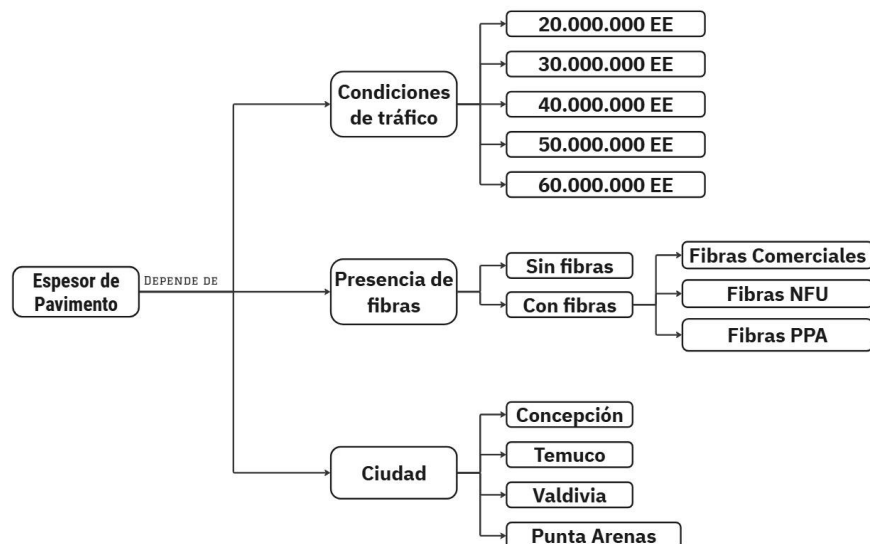


Figura 3. Variables en el diseño de pavimentos

Fuente: Elaboración propia

En el diseño de los recapados, se llevaron a cabo 80 combinaciones, las cuales coinciden en torno a que son desarrolladas sobre un pavimento sin fibras. Similar al diseño de pavimentos, los recapados se evaluaron bajo condiciones de tráfico de entre 20 y 60 millones de ejes equivalentes (EE), utilizando los tres tipos de fibras, sumado con un caso en que se utiliza hormigón convencional. Todo lo anterior diseñado según los datos de las cuatro ciudades mencionadas anteriormente. La figura 4 presenta un resumen de las variables consideradas.

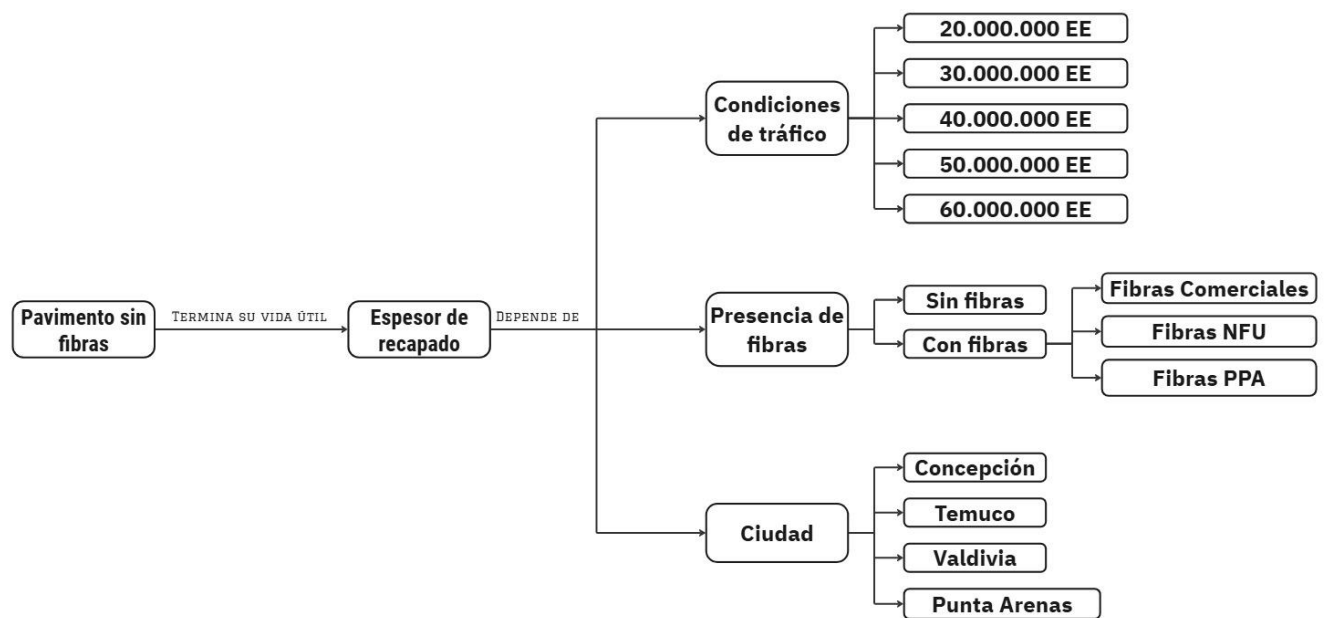


Figura 4. Variables de diseño de recapados

Fuente: Elaboración propia

2.3. PARÁMETROS CONSIDERADOS

El diseño de pavimentos y recapados de hormigón se realizó utilizando el método AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), adaptado a la realidad chilena (AASHTO-MOP). Este método es ampliamente empleado en el diseño de carreteras debido a su enfoque empírico- mecanicista. Se basa en datos obtenidos a través de pruebas a gran escala sobre pavimentos, como las realizadas en el AASHTO Road Test, y permite calcular las tensiones críticas que generan las cargas en los bordes del pavimento, así como los efectos de la temperatura y las condiciones de borde.

Es importante mencionar que, para el análisis de pavimentos rígidos, el método incluye una verificación de los escalonamientos en las juntas transversales. Además, dado a que no se consideran barras de traspaso, también se debe incluir una verificación por un posible agrietamiento en las esquinas de pavimento.

2.3.1. VARIABLES INDEPENDIENTES

En el marco del presente estudio, resulta relevante destacar aquellas variables que se mantienen constantes a lo largo del desarrollo de los distintos casos de estudio analizados. Estas variables son fundamentales para la consistencia y comparabilidad de los resultados obtenidos. En este sentido, la tabla 1 recoge de manera detallada las variables en cuestión, especificando tanto sus valores numéricos como las unidades de medidas correspondientes. Cabe señalar que dichos valores fueron extraídos directamente del Manual de Carreteras (2023), lo que garantiza la fiabilidad y la conformidad con los estándares establecidos con la normativa vigente.

Tabla 1. Variables independientes

Variables Independientes	Valor	Unidad de medida
Índice de serviciabilidad inicial (Pi)	4.5	-
Índice de serviciabilidad final (Pf)	2	-
Módulo de elasticidad del hormigón (Ec)	29000	MPa
Distancia entre juntas de contracción (L)	4	M
Módulo de reacción de la subrasante (k)	27,1	MPa/m
Módulo de elasticidad de la base (Eb)	172.3	MPa
Espesor de la base (Hb)	152	mm
Factor de ajuste por fricción (f)	1.4	-
Factor de ajuste por tipo de berma (TB)	0.9	-
Poisson	0.15	-

Fuente: Elaboración propia en base al Manual de Carretera (2023)

2.3.2. VARIABLES DEPENDIENTES

Consisten en aquellos datos que dependerán del caso de estudio en el que se encuentre. Dentro de la presente investigación, los factores de variabilidad se clasifican en dos grupos:

1. Condiciones climáticas, como temperatura, precipitación, velocidad del viento y días con lluvia mayor a 5 mm. Estas dependen de la ciudad de estudio. Los datos listados en la tabla 2, fueron extraídas de la tabla 3.604.210.A del Manual de Carreteras, 2023.

Tabla 2. Variables dependientes de condiciones de clima

Variable dependiente de la ciudad	Concepción	Valdivia	Temuco	Punta Arenas
Temperatura media anual (°C)	12.4	11	11.2	6.3
Precipitación media anual (mm)	1087.2	1874.1	1278	413.3
Vel. Viento medio anual (nodos)	9.1	5.0	5,2	14.3
Días con precipitación mayor a 5 mm	78	111	70	64.2

Fuente: Adaptación de la tabla 3.604.210. A del Manual de Carreteras (2023)

2. Variables dependientes del tráfico, como desviación estándar del error combinado y el nivel de confianza de la distribución normal, para los diferentes valores de carga, expresados en ejes equivalentes. Estos datos, representados en la tabla 3, fueron obtenidos a partir de la tabla 3.604.205.A del mismo manual, considerando un coeficiente de variación de suelos del 20%.

Tabla 3. Variables dependientes del tráfico

Variables dependientes del tráfico	20.000.000 EE	30.000.000 EE	40.000.000 EE	50.000.000 EE	60.000.000 EE
Desviación estándar del error combinado (S0)	0,36	0,36	0,35	0,35	0,33
Nivel de confianza de la distribución normal (Zr)	-0,343	-0,524	-0,599	-0,674	-0,758

Fuente: Adaptación de la tabla 3.604.205. A del Manual de Carreteras (2023)

2.4. RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN EN EL HORMIGÓN

2.4.1. RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN CON FIBRAS COMERCIALES

La resistencia a la flexotracción es considerada un factor de variabilidad más, debido a que está relacionada con el tipo de fibra utilizado. Para fibras comerciales, se emplearon datos y metodologías presentes en el estudio “*Simplified Method for concrete pavement design with discrete structural fibers*” (Altoubat et al., 2008). En este, se realizaron ensayos de flexión a vigas de hormigón conforme a la norma ASTM C1609. En este ensayo se evalúa el comportamiento del hormigón reforzado sometido a cargas de flexión, utilizando especímenes de dimensiones estándar (500 x 150 x 150 mm). Durante la prueba, se mide la carga aplicada y la correspondiente deflexión en el centro de la viga. Por otro lado, un parámetro importante que se obtiene es el área bajo la curva carga-deflexión hasta un desplazamiento de 3 mm, el cual denomina T (Altoubat et al., 2008).

A partir de los datos mencionados, se calcula la resistencia equivalente a la flexión (f_{e3}) utilizando la siguiente ecuación:

$$f_{e3} = \frac{1000TL}{3bh^2} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

donde L es la luz entre los apoyos (mm), b es el ancho de la viga (mm), h es la altura de la viga (mm) y T es el área bajo la curva carga- deflexión (N * mm). El valor resultante, expresado en MPa, representa la resistencia post- fisuración (Altoubat et al., 2008).

Para evaluar el efecto relativo de las fibras sobre la capacidad del hormigón, se define el índice de resistencia equivalente (Re_3), calculado como:

$$Re_3 = \frac{f_{e3}}{MOR} * 100 \quad (2)$$

donde MOR es el módulo de rotura del hormigón sin refuerzos (MPa). El índice Re_3 se presenta como un porcentaje y proporciona una medida directa del aumento en resistencia aportado por las fibras (Altoubat et al., 2008).

Este índice se utiliza para ajustar el módulo de ruptura del hormigón y así considerar los beneficios de las fibras en el diseño estructural. El módulo de ruptura efectivo (MOR') se calcula mediante:

$$MOR' = MOR \left(1 + \frac{Re_3}{100} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

Este ajuste permite incorporar directamente las mejoras en la resistencia a la flexión en los cálculos de diseño, lo que puede traducirse en una reducción significativa del espesor requerido en pavimentos o elementos estructurales (Altoubat et al., 2008).

Por último, el artículo mencionado incorpora una tabla en donde se proporcionan los valores de Re_3 para distintos tipos de fibras y en diferentes dosificaciones. Dentro de ellas, para este estudio se seleccionaron las fibras de acero con extremos enganchados, las cuales se encuentran en una proporción de volumen de 0,35%, lo que corresponde a un Re_3 de 43%. Cabe mencionar que el criterio de selección fue mediante las fibras que

se encontraran en menor proporción dentro de la mezcla de hormigón, de manera de seguir el procedimiento más conservador posible.

2.4.2. RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN EN FIBRAS RECICLADAS

En el caso de las fibras recicladas, no fue posible emplear el mismo criterio de cálculo, debido a que la información disponible en la literatura no incluía el valor del área bajo la curva de carga-deflexión. En su lugar, se proporciona diferentes valores de la resistencia a la flexotensión de las muestras con y sin fibras recicladas. Además, la mejor dosificación reportada para estas fibras corresponde a 0,5 % del volumen de hormigón (Nazer et., al 2018; Córdova & Turpo, 2019).

Ante esta problemática se optó por adoptar el enfoque más conservador el cual consistió en tomar como base la resistencia de las muestras sin fibras y calcular el menor aumento en la resistencia con la presencia con fibras. Para el caso de las fibras NFU el incremento fue del 2%. En el caso de las fibras PPA, el aumento registrado fue del 7% respecto a la muestra sin fibras.

2.5. DISEÑO DE PAVIMENTOS

Como se mencionó anteriormente, el diseño del espesor de los pavimentos se realizó utilizando el método AASHTO, adaptado a las condiciones específicas de Chile (AASHTO-MOP). Este proceso, descrito en el Manual de Carreteras (2023) sección 3.604.2, incluye una serie de etapas secuenciales dentro de las cuales se encuentran:

1. Definición de propiedades de entrada, lo cual se debe realizar teniendo en cuenta aquellos datos que cambian caso a caso y cuales se mantienen constantes. El primer caso corresponde a aquellas características que dependen de las condiciones climáticas y de tráfico, mientras que el segundo caso corresponde a aquellas características intrínsecas del pavimento.

2. Cálculo de la tensión de borde de la losa. Este paso consiste en evaluar la resistencia del pavimento frente a las cargas aplicadas. Se calcula considerando las fuerzas y momentos que actúan sobre el pavimento, lo que permite analizar los puntos críticos en los bordes de la losa.
3. Cálculo del diferencial de temperatura efectivo, el que consiste en la diferencia de temperatura entre la superficie y la base de la losa, lo que corresponde a un paso importante para predecir los esfuerzos térmicos que afectan la durabilidad del pavimento.
4. Cálculo del factor de ajuste por fricción entre la losa de hormigón y la subbase, lo que influye en la distribución de tensiones a lo largo de la losa. Una fricción adecuada es vital para minimizar los desplazamientos indeseados y así mejorar la estabilidad estructural del pavimento.
5. Cálculo del factor de correlación por longitud de losa. Este factor afecta la distribución de los esfuerzos generados por cargas vehiculares y variaciones térmicas. Cabe destacar que los esfuerzos de flexión varían según la longitud y anchura de la losa.
6. Cálculo de la correlación de la tensión de borde. En este paso se realiza la correlación entre la tensión de borde y los factores calculados anteriormente, lo que permite ajustar las tensiones en función específica del diseño.
7. Cálculo de la ecuación principal y ecuaciones de diseño, en donde se emplean las ecuaciones establecidas en el método para calcular los parámetros principales de diseño del pavimento, proporcionando una visión integral del comportamiento del pavimento bajo distintas condiciones de carga y temperatura.

A partir de los pasos mencionados se determina el espesor de la losa. Este espesor debe ser el suficiente para soportar todas las solicitaciones a las que será sometido.

Para verificar la validez del diseño, se llevaron a cabo dos comprobaciones establecidas en el Manual de Carreteras (2023):

1. Verificación por escalonamiento. El escalonamiento en las juntas transversales puede traer problemas en la funcionalidad y seguridad del pavimento. Es por esta

razón, que la verificación evalúa que la superficie mantenga criterios de estabilidad y confort, minimizando el impacto del tráfico en las juntas.

2. Verificación por carga de esquina. En las esquinas de las losas se prevé que ocurran los esfuerzos máximos debido a la carga vehicular, por lo que esta verificación asegura que el diseño sea capaz de resistir las cargas extremas en los puntos más críticos de la losa.

Este procedimiento fue aplicado en cada uno de los casos de estudio, asegurando así un análisis exhaustivo sobre los diferentes cambios que ocurren debido a la incorporación de fibras.

Cabe mencionar que en el anexo 1 se visualizan los esquemas resúmenes de este procedimiento de diseño, los cuales son obtenidos del Manual de Carreteras (2023).

2.6. DISEÑO DE RECAPADOS

Para el diseño de los diferentes casos en recapados, se utilizó el método AASHTO- MOP, descrito en el Manual de Carreteras (2023), sección 3.605.5. En esta sección se describe el paso a paso de la reposición de pavimentos de hormigón con hormigón no adherido, el cual sigue el siguiente procedimiento:

1. Determinación de las solicitaciones de tránsito futuro. El criterio que se utilizó para la determinación de las solicitudes futuras consiste en calcular el espesor de losa necesario para que el recapado del hormigón con fibras comerciales tenga un espesor de 10 cm, valor recomendado para que un recapado tenga un buen desempeño dentro de su vida útil (Nacional Concrete Pavement Technology Center, 2007). A partir de este espesor se calcula la capacidad de diseño futuro.
2. Cálculo del espesor requerido para el pavimento de hormigón (D_t). Este espesor se debe calcular como si se tratase de un pavimento nuevo, sin considerar el pavimento existente y de manera que el espesor del recapado en el caso de pavimentos con fibras comerciales tenga un espesor de 10 cm.

3. Cálculo del espesor efectivo del pavimento actual (D_{ef}), lo que considera la capacidad estructural del pavimento antiguo. En este caso, el espesor efectivo se calcula por medio del método basado en la vida útil remanente, el cual se explica en la sección 3.605.104 (c) y 3.605.503 (4) del Manual de Carreteras (2023) y sigue las siguientes ecuaciones:

$$VR = 100 * \left(1 - \frac{EE_p}{EE_{1,5}} \right) \quad (4)$$

En donde VR es la vida útil remanente en porcentaje, EE_p son los ejes equivalentes acumulados hasta la fecha y $EE_{1,5}$ son los ejes equivalentes necesarios para llevar la estructura a un Pf a 1,5, proceso que se explica de manera esquemática en el Anexo 2.

Este método de cálculo permite asumir que al momento de colocar el recapado, el pavimento ya ha cumplido toda su capacidad de diseño. Es decir, si es que el pavimento tiene una capacidad de diseño de 20 millones de ejes equivalentes, al momento de calcular el recapado se utiliza un EE_p de 20.

4. Determinación del espesor necesario de la nueva losa (D_{rep}), el cual se realiza siguiendo la ecuación a continuación:

$$D_{rep} = \sqrt{D_f^2 - D_{ef}^2} \quad (5)$$

Cabe destacar que este procedimiento fue implementado en todos los casos de tráfico y condiciones de pavimento. Por otro lado, se debe tener en cuenta que el recapado fue aplicado sobre un pavimento existente sin fibras, del cual el espesor va cambiando, dependiendo la ciudad y la condición de tráfico en donde se esté.

2.7. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

El análisis de ciclo de vida (ACV) tiene como objetivo evaluar los aspectos ambientales y los posibles impactos que surgen a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o actividad (Vogtländer, 2023). El ACV incluye desde la obtención de materias primas hasta la disposición final de los residuos, abarcando todas las fases intermedias, tales como el transporte, la preparación de las materias primas, manufactura y distribución. De esta manera, el ACV actúa como un sistema de contabilidad ambiental, asignando a cada producto o sistema los efectos ambientales derivados de cada etapa del ciclo de vida (Vogtländer, 2023).

En la presente investigación, se analiza el ciclo de vida de un producto en específico, correspondiente a los diferentes casos de pavimentos y recapados de hormigón. Este ciclo de vida se organiza en cinco etapas principales: extracción de materias primas, fabricación, transporte, uso y disposición final de los residuos. Cabe señalar que, aunque el transporte se presenta como una tercera etapa, puede ocurrir en cualquiera de las fases del ciclo. En la figura 5 se muestra un esquema que ilustra cómo interactúan entre sí las etapas mencionadas, proporcionando una visión integral de los elementos que abarca un análisis del ciclo de vida

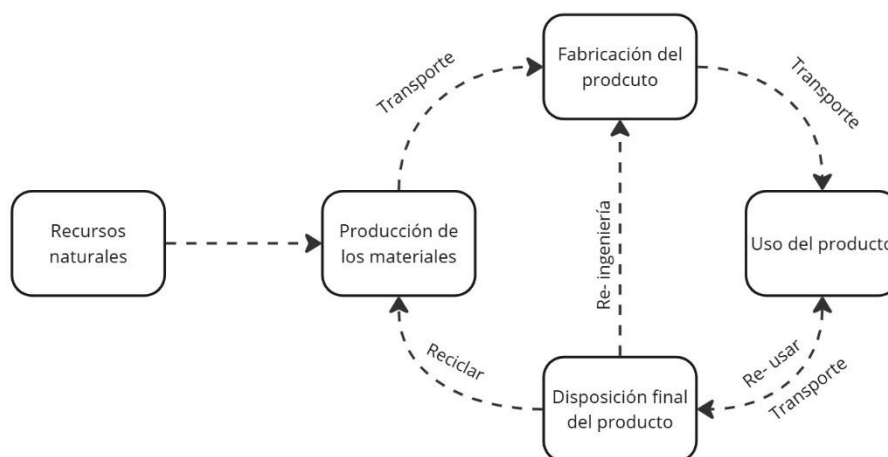


Figura 5.Ciclo de vida de un producto
Fuente: Adaptación de Vogtländer (2023)

El procedimiento para realizar el ACV de manera sistemática se encuentra establecido en las normativas desarrolladas por la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés *Internacional Organization for Standardization*). Las normas específicas que regulan este análisis corresponden a la ISO 14040 y la ISO 14044, ambas publicadas en 2006. Según estas directrices, el primer paso para llevar a cabo un ACV consiste en definir los objetivos del estudio. En esta etapa, es fundamental especificar las razones que motivan el análisis, así como la información que se espera obtener a partir de los resultados. Tras esta definición, se deben describir las funciones que caracterizan el sistema de estudio. Cuando el ACV se utiliza para comparar el desempeño ambiental de distintos sistemas, es esencial que estos cumplan una función equivalente (Organización Internacional de Normalización, 2006).

A continuación, se define la unidad funcional, que constituye la base de cálculo sobre la cual se realizan los balances. En los análisis de ciclo de vida comparativos, se selecciona una unidad funcional que refleje de manera precisa la función que se desea contrarrestar entre los sistemas analizados (Organización Internacional de Normalización, 2006).

Por último, es necesario establecer los límites del sistema, lo que determina el alcance de la investigación. En esa fase, se identifican los procesos unitarios necesarios para la producción de un producto objeto de estudio, que en este caso corresponde al pavimento. Estos procesos incluyen la obtención de recursos, los procesos de fabricación y el transporte de los componentes y materias primas, así como también el resto de las etapas del ciclo de vida del producto (Organización Internacional de Normalización, 2006). Resulta de vital importancia definir las etapas del sistema que serán incluidos en el estudio y los criterios empleados para su selección, debido a que esto le brinda coherencia al estudio con los objetivos propuestos. En la figura 6 se evidencia un esquema que resume las etapas consideradas en la norma ISO 14040.

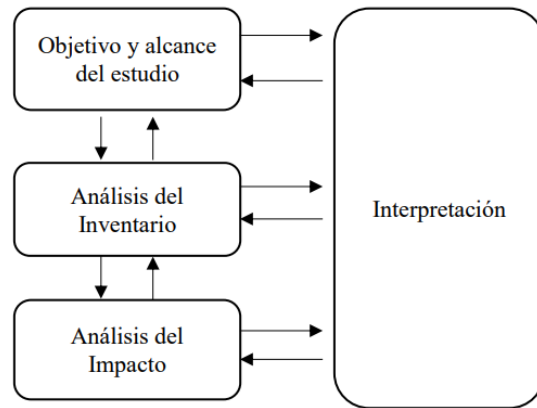


Figura 6. Fases del análisis del ciclo de vida
Fuente: Organización Internacional de Normalización (2006)

Por su parte, la tabla 4 ofrece un resumen de las variables previamente mencionadas, ajustadas a los objetivos específicos del estudio. Estas variables se clasifican de forma individual, permitiendo identificar las funciones correspondientes y los valores asociados a cada caso analizado. Dado el gran número de casos abordados en esta investigación, esta clasificación facilita la visualización y comprensión de los datos, que de otro modo podrían resultar poco evidentes a primera vista.

Tabla 4. Objetivos y alcances del sistema de estudio

Objetivo del análisis		Analizar la reducción de impactos ambientales en pavimentos y recapados de hormigón debido a la incorporación de fibras metálicas vírgenes y recicladas.
Pavimento sin fibras	Función del sistema	Construcción de un pavimento rígido sin fibras que sirva como patrón de comparación. El espesor variará según la ciudad y las solicitaciones a las que este sometido
	Unidad Funcional	1 kilómetro de pavimento
	Límites del sistema	Método Streamlined Life Cycle Assessment (SLCA)
		Espesor variable depende de la ciudad en que se diseñe
		Se consideraron los casos de Concepción, Temuco, Valdivia y Punta Arenas
		Para LCA se utilizó el diseño de 20 millones de ejes equivalentes de cada ciudad
Pavimento con fibras comerciales	Función del sistema	Construcción de un pavimento rígido reforzado con fibras comerciales. Las fibras reducen el espesor, pero se debe considerar el impacto de las fibras
	Unidad Funcional	1 kilómetro de pavimento
	Límites del sistema	Método Streamlined Life Cycle Assessment (SLCA)
		Espesor variable depende de la ciudad en que se diseñe
		Se consideraron los casos de Concepción, Temuco, Valdivia y Punta Arenas
		Para LCA se utilizó el diseño de 20 millones de ejes equivalentes de cada ciudad
Pavimento con fibras recicladas a partir de NFU	Función del sistema	Construcción de un pavimento rígido reforzado con fibras recicladas a partir de neumáticos fuera de uso (NFU). Las fibras reducen el espesor, pero se debe considerar el impacto de las fibras
	Unidad Funcional	1 kilómetro de pavimento
	Límites del sistema	Método Streamlined Life Cycle Assessment (SLCA)
		Espesor variable depende de la ciudad en que se diseñe
		Se consideraron los casos de Concepción, Temuco, Valdivia y Punta Arenas
		Para LCA se utilizó el diseño de 20 millones de ejes equivalentes de cada ciudad
Pavimento con fibras recicladas a partir de residuos de I.A.	Función del sistema	Construcción de un pavimento rígido reforzado con fibras recicladas a partir de residuos de la industria del acero (I.A.). Las fibras reducen el espesor, pero se debe considerar el impacto de las fibras
	Unidad Funcional	1 kilómetro de pavimento
	Límites del sistema	Método Streamlined Life Cycle Assessment (SLCA)
		Espesor variable depende de la ciudad en que se diseñe
		Se consideraron los casos de Concepción, Temuco, Valdivia y Punta Arenas
		Para LCA se utilizó el diseño de 20 millones de ejes equivalentes de cada ciudad

Fuente: Elaboración Propia

En el presente proyecto se empleó el método *Streamlined Life Cycle Assessment* (SLCA), un tipo de análisis de ciclo de vida simplificado que permite comparar dos o más alternativas, centrándose únicamente en sus diferencias (Vogtländer, 2023). Este enfoque facilita el proceso de análisis al reducir los cálculos a aquellos aspectos en los que las opciones presentan variación. En este caso, el método considera las tres primeras etapas del ciclo de vida: (1) extracción de materias primas, (2) producción de materiales y (3) fabricación del pavimento, asumiendo que las etapas restantes del ciclo de vida son equivalentes entre los diferentes casos de estudio.

La fase de uso y disposición final se asumen equivalentes debido a que se prevé que el pavimento soportará el mismo volumen de tráfico a lo largo de su vida útil, lo que quiere decir que la resistencia estructural se mantiene.

En la figura 7 se presentan las etapas consideradas en el análisis de ciclo de vida, que incluyen la extracción de materias primas, la producción de materiales y la fabricación del producto.

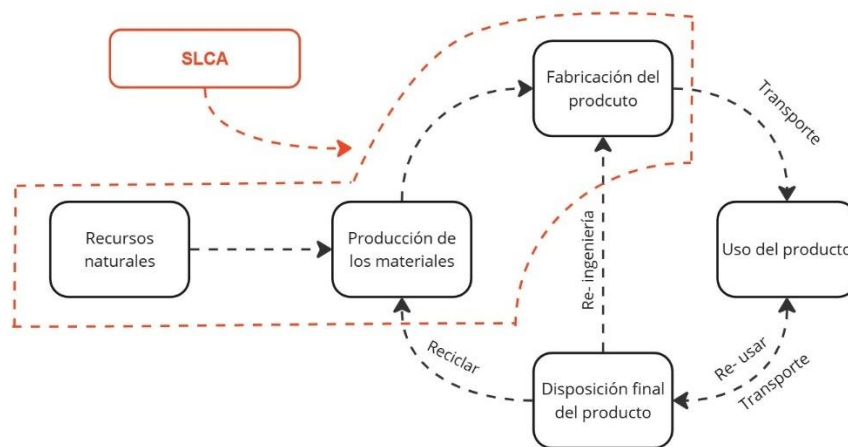


Figura 7. Streamlined Life Cycle Assessment

Fuente: Elaboración propia

2.8. SOFTWARE OPENLCA

Para el análisis de impacto ambiental se empleó el software OpenLCA, desarrollado por la empresa GreenDelta desde 2006. Este programa gratuito ha sido ampliamente utilizado en trabajos de investigación, principalmente por ser adaptable y flexible; además, ha sido aplicado en estudios relacionados con el análisis de pavimentos (César & Pradena, 2020).

En la presente investigación, se utilizó OpenLCA para realizar el análisis del impacto ambiental. Se ingresaron los procesos correspondientes y, por medio de la herramienta computacional TRACI (del inglés, *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*), se calcularon los impactos ambientales asociados. Esta herramienta estadounidense fue diseñada para evaluar la sostenibilidad, el impacto del ciclo de vida, la ecología industrial y el impacto en el diseño de procesos (Serafini & Ciroth, 2024).

TRACI permite la cuantificación detallada de una variedad de factores ambientales, tales como el agotamiento de la capa de ozono, el cambio climático (expresado en kgCO₂eq), acidificación, eutrofización, generación de smog fotoquímico, el efecto de las partículas y sustancias en la salud humana, ecotoxicidad y el agotamiento de los combustibles fósiles (Serafini & Ciroth, 2024).

Con respecto a la metodología utilizada por esta herramienta computacional, se destaca que emplea la cantidad de emisión química o el recurso utilizado, así como la potencia estimada del factor de estrés. Esta potencia se basa en los mejores modelos y datos disponibles para cada categoría de impacto (Serafini & Ciroth, 2024). La base de datos empleada en la investigación fue Ecoinvent LCIA methods.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados del análisis experimental, llevado a cabo conforme a la metodología descrita en el capítulo 2.

En primer lugar, se exponen los resultados relacionados con el diseño estructural de los pavimentos. A continuación, se detallan los datos obtenidos en el diseño de recapados, para luego seguir con los diferentes ACV. En el caso de los pavimentos, se presenta una comparación entre los pavimentos con y sin fibras, destacándose el caso más favorable, correspondiente al mayor porcentaje de reducción en el espesor, y el más desfavorable, donde dicha disminución es menor.

Por último, se exponen los resultados del ACV proyectado para 20 millones de ejes equivalentes en el diseño de recapados, permitiendo una vista en el comportamiento de los diseños.

3.2. RESULTADOS EN DISEÑO DE PAVIMENTOS

Como se mencionó anteriormente, el diseño se desarrolló para diferentes condiciones climáticas, las que se representan diseñando los pavimentos en diferentes ciudades del país. Además, se diseña para las condiciones de tráfico de 20, 30, 40, 50 y 60 millones de ejes equivalentes. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cuanto al espesor de losa para las diferentes ciudades:

- Resultados en Concepción:

Tabla 5. Espesores de losa en Concepción

CONCEPCIÓN							
Ejes Equivalentes (millones)	Espesor sin fibras (mm)	Espesor fibras comerciales (mm)	% de disminución	Espesor con fibras NFU (mm)	% de disminución	Espesor fibras PPA (mm)	% de disminución
20	239	171	28.45	235.00	1.67	223.00	6.69
30	264	191	27.65	259.00	1.89	247.00	6.44
40	281	203	27.76	276.00	1.78	262.00	6.76
50	293	215	26.62	285.00	2.73	276.00	5.80
60	306	224	26.80	299.00	2.29	287.00	6.21

Fuente: Elaboración propia

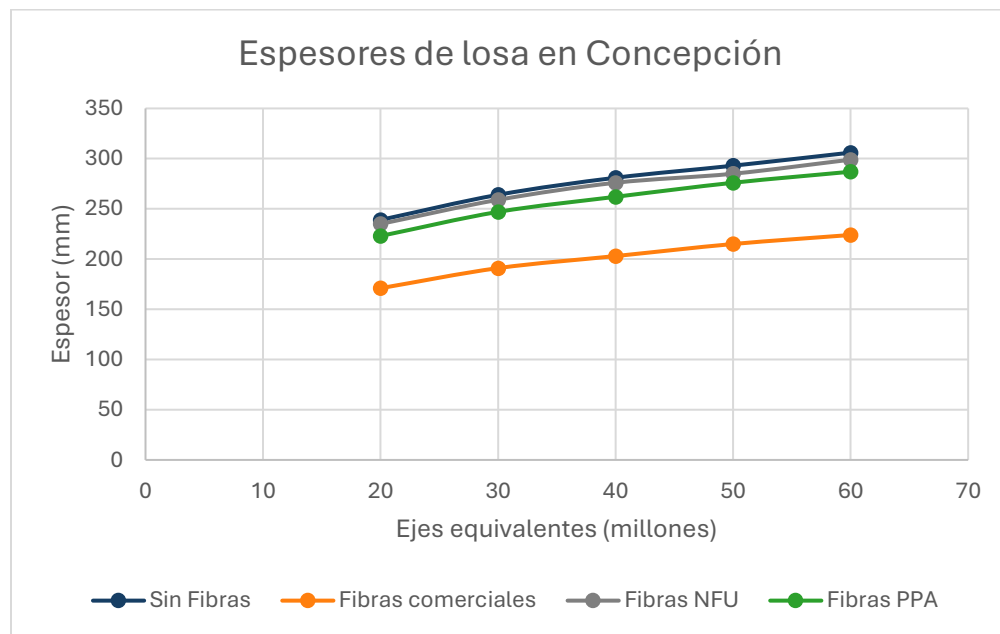


Figura 8. Espesores de losa en Concepción

Fuente: Elaboración propia

- Resultados en Temuco

Tabla 6. Espesores de losa en Temuco

TEMUCO							
Ejes Equivalentes (millones)	Espesor sin fibras (mm)	Espesor fibras comerciales (mm)	% de disminución	Espesor con fibras NFU (mm)	% de disminución	Espesor fibras PPA (mm)	% de disminución
20	196	159	18.88	192.00	2.04	179.00	8.67
30	217	177	18.43	214.00	1.38	203.00	6.45
40	231	190	17.75	227.00	1.73	216.00	6.49
50	240	200	16.67	236.00	1.67	227.00	5.42
60	249	209	16.06	245.00	1.61	235.00	5.62

Fuente: Elaboración propia

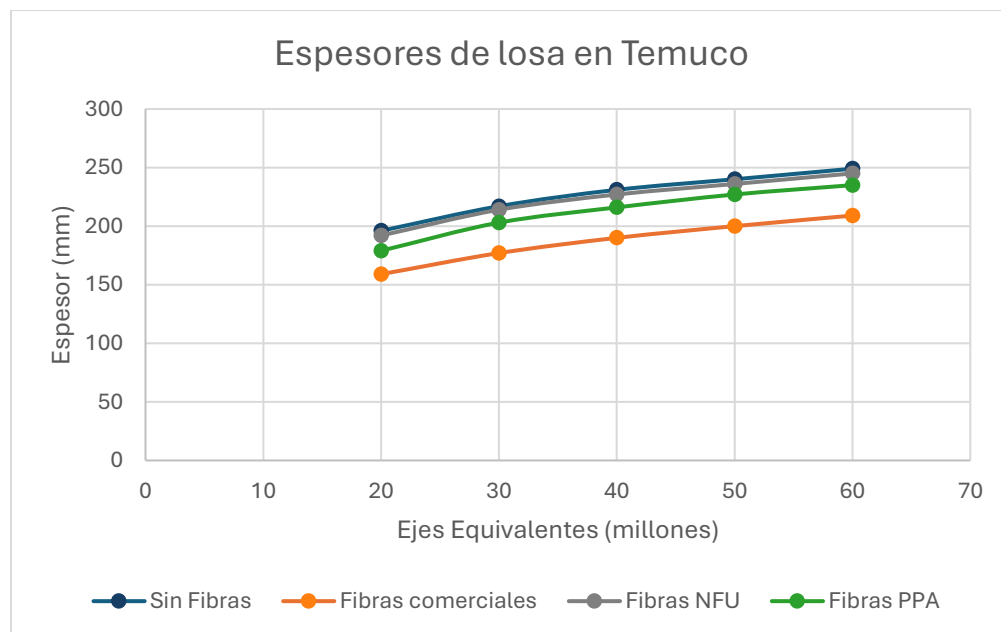


Figura 9. Espesores de losa en Temuco

Fuente: Elaboración propia

- Resultados en Valdivia

Tabla 7. Espesores de losa en Valdivia

VALDIVIA							
Ejes Equivalentes (millones)	Espesor sin fibras (mm)	Espesor fibras comerciales (mm)	% de disminución	Espesor con fibras NFU (mm)	% de disminución	Espesor fibras PPA (mm)	% de disminución
20	192	157	18.23	187.00	2.60	173.00	9.90
30	214	175	18.22	210.00	1.87	199.00	7.01
40	227	187	17.62	223.00	1.76	213.00	6.17
50	238	198	16.81	234.00	1.68	224.00	5.88
60	246	206	16.26	242.00	1.63	232.00	5.69

Fuente: Elaboración propia

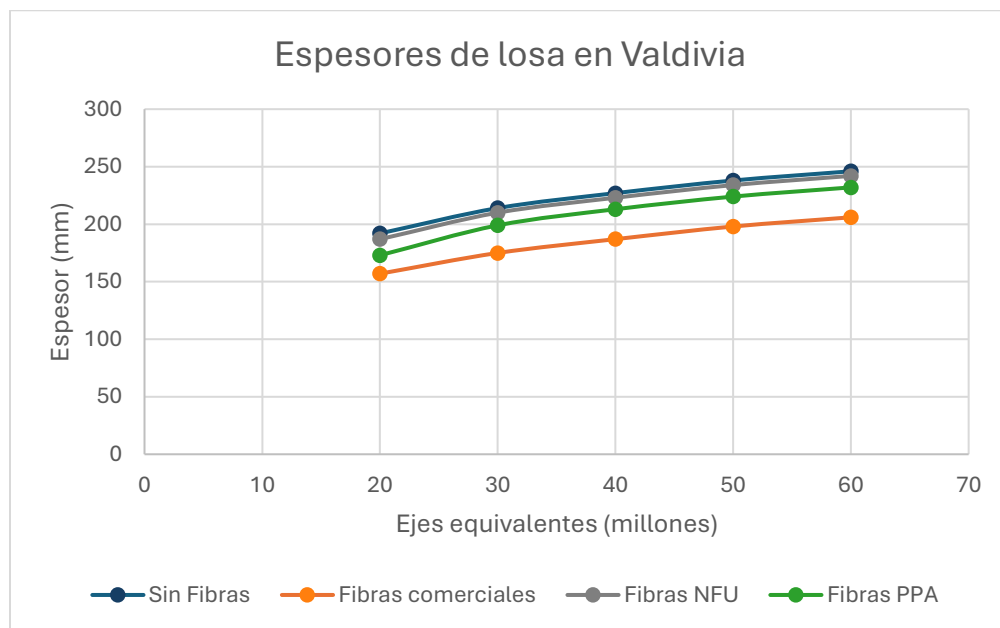


Figura 10. Espesores de losa en Valdivia

Fuente: Elaboración propia

- Resultados en Punta Arenas

Tabla 8. Espesores de losa en Punta Arenas

PUNTA ARENAS							
Ejes Equivalentes (millones)	Espesor sin fibras (mm)	Espesor fibras comerciales (mm)	% de disminución	Espesor con fibras NFU (mm)	% de disminución	Espesor fibras PPA (mm)	% de disminución
20	241	169	29.88	233.00	3.32	225.00	6.64
30	266	184	30.83	251.00	5.64	249.00	6.39
40	283	203	28.27	275.00	2.83	264.00	6.71
50	297	212	28.62	286.00	3.70	278.00	6.40
60	308	223	27.60	300.00	2.60	289.00	6.17

Fuente: Elaboración propia

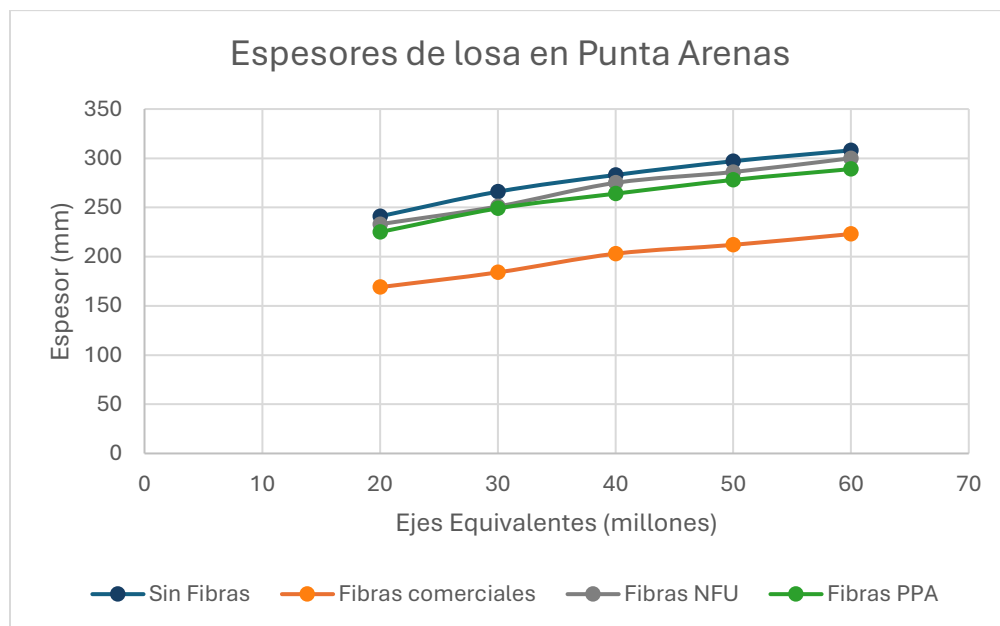


Figura 11. Espesores de losa en Punta Arenas

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos en relación con los espesores de losa reflejan una tendencia consistente. Las mayores reducciones en el espesor se presentan con la incorporación de fibras comerciales en el hormigón, seguidas de los casos en donde se introducen fibras PPA y, finalmente, por las fibras NFU. Este comportamiento puede explicarse por el aumento significativo en la resistencia a la flexotracción que proporcionan las fibras, lo que optimiza el desempeño estructural al mantener su capacidad de diseño, incluso con menores espesores.

Al analizar los resultados en las distintas ciudades evaluadas, se observan diferencias atribuidas a las condiciones climáticas particulares de cada caso. En este contexto, las diferencias observadas en los espesores de las losas entre ciudades se deben principalmente al cambio del diferencial de temperatura, el cual depende en gran medida de las condiciones del viento de las diferentes localidades. Por ejemplo, al comparar las ciudades de Concepción y Valdivia, se observa que, en todos los casos, los espesores en Valdivia son menores. Esto puede relacionarse con los datos climáticos presentados en la tabla 2, donde se evidencia que el viento en Valdivia es de 5 nudos, mientras que en Concepción alcanza los 9.1 nudos. Por lo tanto, las condiciones locales de viento influyen significativamente en el cálculo del diferencial efectivo de temperatura de diseño, afectando directamente los resultados finales y las verificaciones realizadas.

A pesar de lo anterior, la tendencia mencionada con respecto a la reducción de espesores se mantiene en todos los casos, lo que refuerza la validez del análisis comparativo y las conclusiones obtenidas. Además, los resultados muestran que, a medida que aumenta la demanda de tráfico, expresada en millones de ejes equivalentes, se incrementa la necesidad de espesor de losas. Este comportamiento es congruente desde el punto de vista teórico- práctico, ya que pavimentos sometidos a mayores cargas acumuladas requieren mayores espesores para así garantizar su durabilidad y funcionalidad a lo largo de la vida útil.

Dicho en otras palabras, la incorporación de fibras, especialmente comerciales, demuestra ser una solución eficaz para optimizar el diseño del pavimento, ya que permite reducir el espesor sin comprometer la capacidad de diseño. Este resultado conlleva, además, a una disminución en el uso de material, lo que potencialmente reduciría los

impactos ambientales asociados. Por otro lado, se confirma que factores como las condiciones climáticas, particularmente el viento, y la demanda de tráfico influyen directamente en el espesor final de las losas.

3.3. RESULTADOS EN DISEÑO DE RECAPADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los diseños de recapados, los cuales fueron diseñados sobre un pavimento sin fibras, bajo el criterio de que el recapado con fibras comerciales, que potencialmente tendría el menor espesor, debe alcanzar un espesor de 100 mm.

- Resultados en Concepción

Tabla 9. Espesor de recapados en Concepción

Concepción					
Ejes Equivalentes (millones)	Incremento de EE (millones)	Sin Fibras (mm)	Fibras Comerciales (mm)	Fibras NFU (mm)	Fibras PPA (mm)
20	20	192	100	188	172
30	30	205	100	200	183
40	40,5	214	100	209	191
50	50,8	221	100	215	196
60	61,3	228	100	222	202

Fuente: Elaboración propia

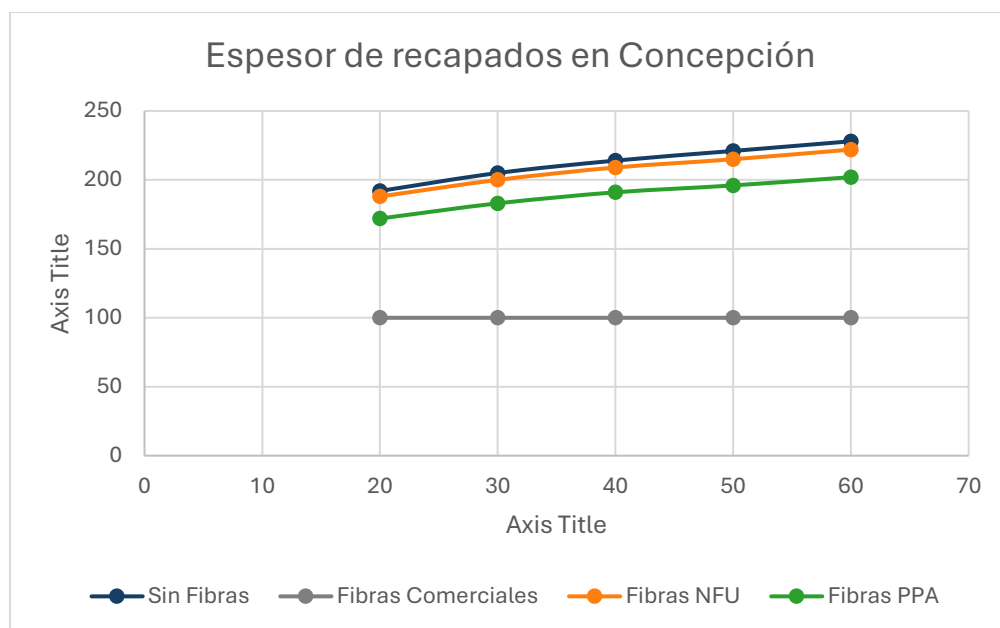


Figura 12. Espesor de recapados en Concepción
Fuente: Elaboración propia

- Resultados en Temuco

Tabla 10. Espesor de recapado en Temuco

Temuco					
Ejes Equivalentes (millones)	Incremento de EE (millones)	Sin Fibras (mm)	Fibras Comerciales (mm)	Fibras NFU (mm)	Fibras PPA (mm)
20	20	183	100	179	165
30	30,8	196	100	191	175
40	42	205	100	200	183
50	54	214	100	208	190
60	68,5	223	100	217	198

Fuente: Elaboración propia

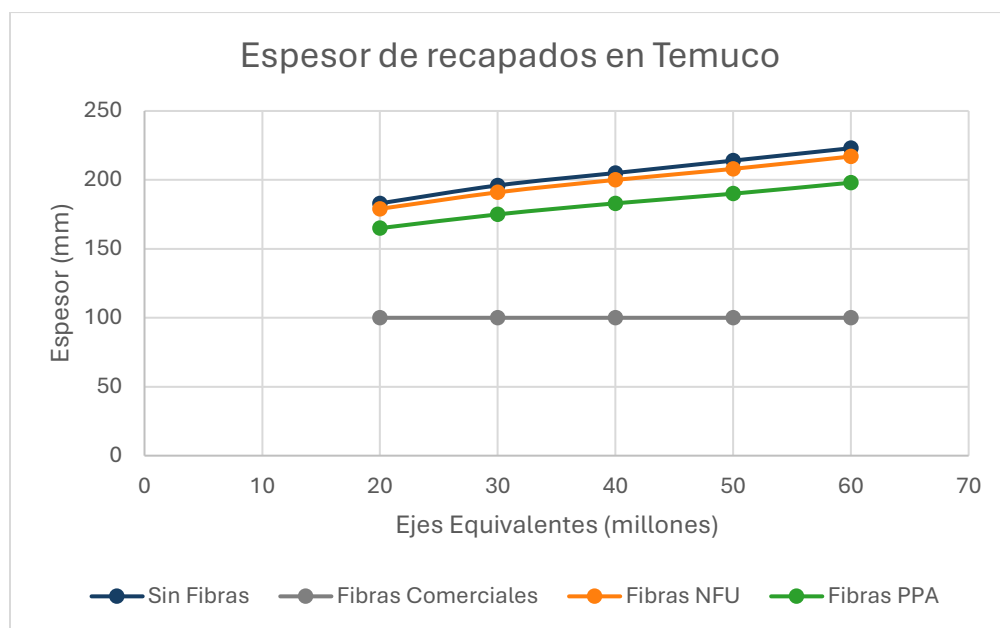


Figura 13. Espesores de recapados en Temuco

Fuente: Elaboración propia

- Resultados en Valdivia

Tabla 11. Espesor de recapados en Valdivia

Valdivia					
Ejes Equivalentes (millones)	Incremento de EE (millones)	Sin Fibras (mm)	Fibras Comerciales (mm)	Fibras NFU (mm)	Fibras PPA (mm)
20	20	181	100	177	164
30	30,7	194	100	189	174
40	41,9	203	100	198	182
50	54	212	100	207	189
60	66,8	219	100	213	194

Fuente: Elaboración propia

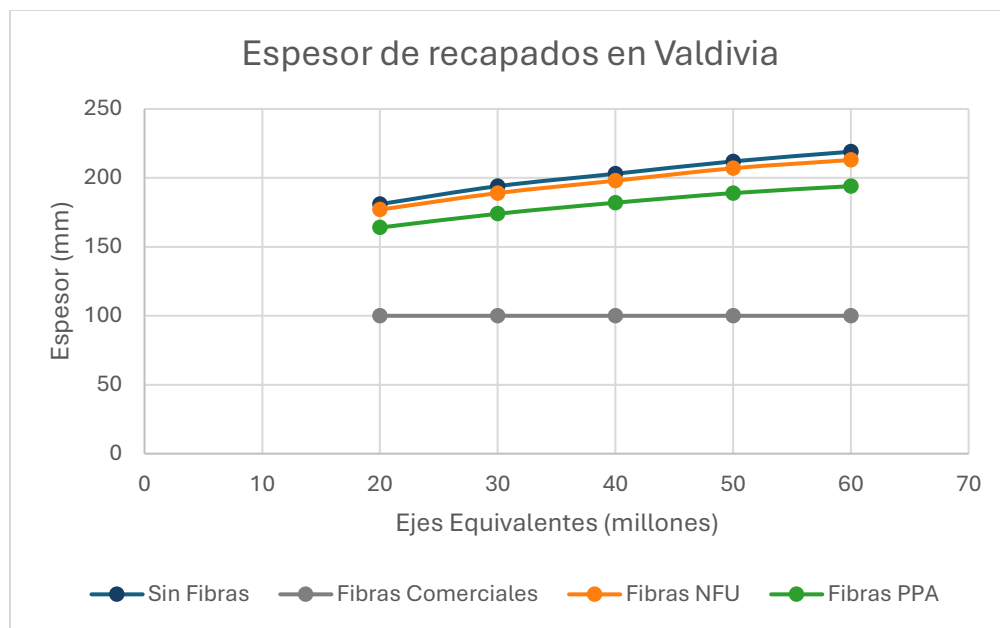


Figura 14. Espesores de recapados en Valdivia

Fuente: Elaboración propia

- Resultados en Punta Arenas

Tabla 12. Espesor de recapados en Punta Arenas

Punta Arenas					
Ejes Equivalentes (millones)	Incremento de EE (millones)	Sin Fibras (mm)	Fibras Comerciales (mm)	Fibras NFU (mm)	Fibras PPA (mm)
20	20	193	100	188	173
30	30,2	206	100	201	184
40	40,5	215	100	210	192
50	50,8	222	100	217	197
60	61,4	229	100	223	203

Fuente: Elaboración Propia

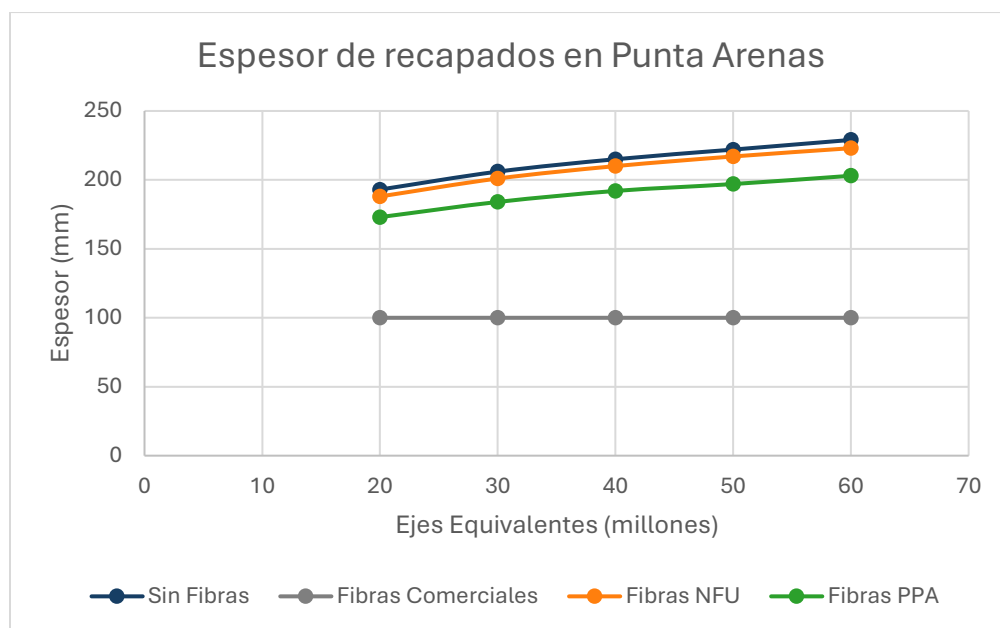


Figura 15. Espesores de losa en Punta Arenas

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos, se observa que, al emplear un espesor mínimo de 10 cm en los casos donde el refuerzo fuera por medio de las fibras comerciales, se logra un incremento significativo en la capacidad de carga del pavimento existente, el cual, como se mencionó anteriormente, corresponde a un pavimento sin refuerzos. Este aumento se debe a que el nuevo recapado actúa como una capa adicional de resistencia, capaz de distribuir las cargas vehiculares de manera eficiente sin transferir el peso directamente a la estructura original. Según lo descrito por el Manual de Carreteras (2023), este tipo de intervención tiene como objetivo restaurar y prolongar la vida útil del pavimento de manera estructuralmente sólida y económicamente eficiente, lo que se comprueba al analizar la extensión en la vida útil.

El espesor de 10 cm como medida mínima se considera como óptima, ya que permite que el recapado cumpla con los requisitos necesarios para mejorar la capacidad de carga del pavimento, lo cual se estima por medio del cálculo de la vida remanente. Este cálculo determina la cantidad de ejes equivalentes que un pavimento puede soportar antes de alcanzar su límite de servicio. Al incorporar esta capa de hormigón reforzado, el pavimento no solo recupera su capacidad estructural original, sino que la duplica,

logrando en todos los casos un incremento de al menos el 100% respecto a su capacidad inicial y extendiendo significativamente la vida útil prevista.

Desde una perspectiva ambiental, el diseño de recapados con hormigón reforzado con fibras se presenta como una solución sostenible. Al aumentar la durabilidad del pavimento, se reduce la necesidad de reparaciones y recapados frecuentes, lo que conlleva una disminución en el consumo de materiales y en la generación de residuos. Por otro lado, al tener un espesor menor al que se tendría sin los refuerzos, se tiene una disminución extra en los impactos ambientales, debido a que el simple hecho del menor uso de materiales ya tiene consecuencias positivas, tal como se verá en el análisis de ciclo de vida. Además, al prolongar la vida útil de la infraestructura existente, se mitiga el impacto ambiental asociado con la producción de nuevos materiales y con la disposición final de su ciclo de vida.

Por último, las tendencias con respecto a las diferentes ciudades se mantienen, pues se utilizó el mismo método para el cálculo de los espesores futuros, por lo que se repite el fenómeno descrito en la sección 3.2 de la investigación.

3.4. RESULTADOS ANÁLISIS CICLO DE VIDA

3.4.1. ACV DE PAVIMENTOS PARA 20 MILLONES DE EJES EQUIVALENTES

En las siguientes figuras se visualizan los resultados obtenidos mediante el software OpenLCA. En este, se modelaron los pavimentos sin la incorporación de fibras, como también los casos en que se incluían.

Cabe mencionar que se modeló el caso de 20 millones de ejes equivalentes debido a que en todos los casos fue donde se encontraron los mayores porcentajes de reducción en el espesor de las losas. En el anexo 3 se encuentran las tablas cuyos datos fueron graficados en las siguientes figuras, junto con la dosificación empleada para el diseño de 1 km de pavimento en cada uno de los casos.

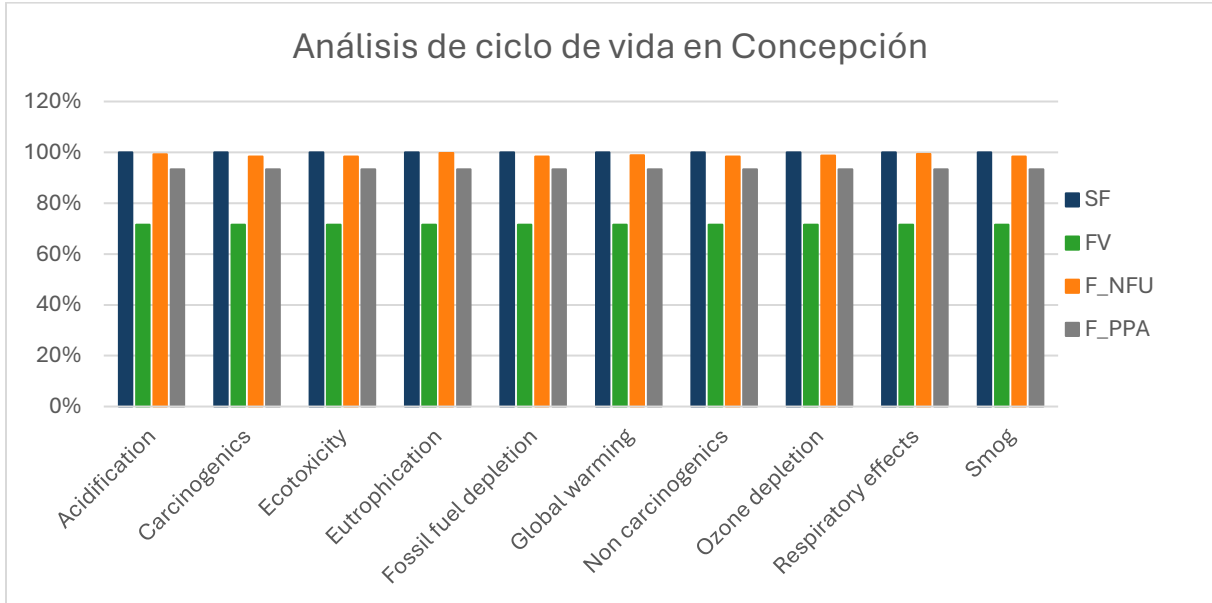


Figura 16. Impactos en Concepción para 20 millones de EE
Fuente: Elaboración propia

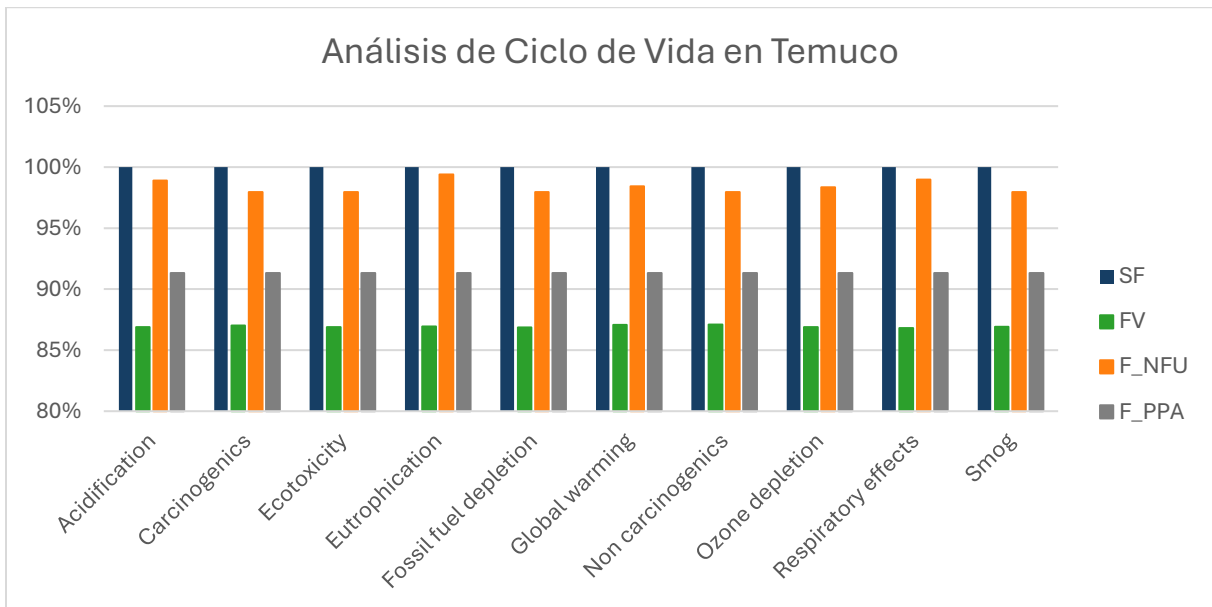


Figura 17. Impactos en Temuco para 20 millones de EE
Fuente: Elaboración propia

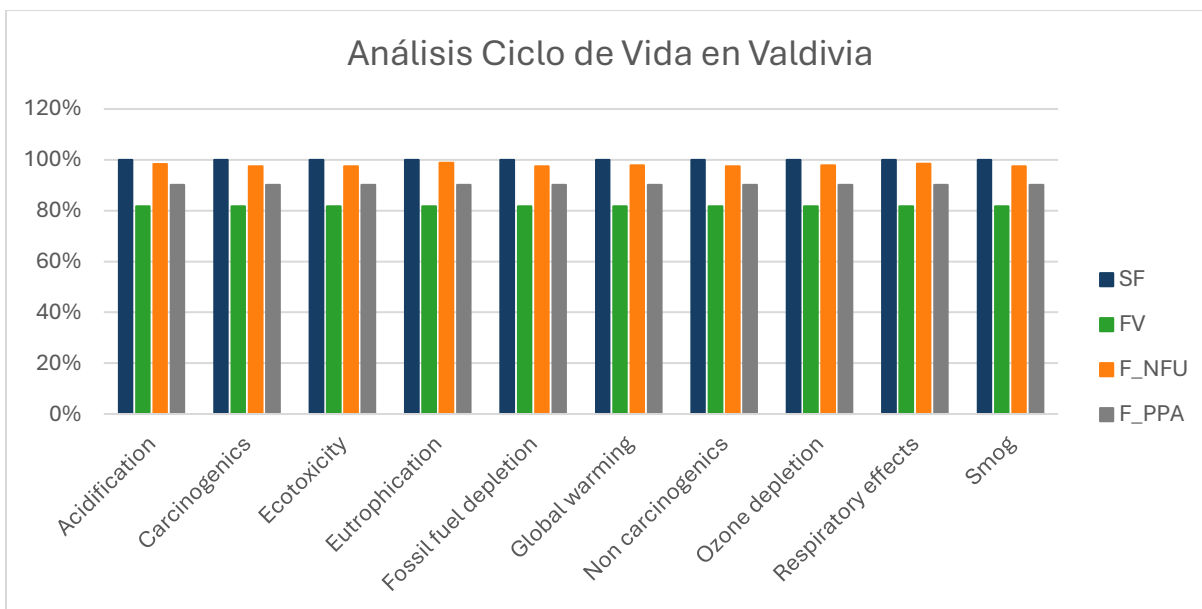


Figura 18. Impactos en Valdivia para 20 millones de EE

Fuente: Elaboración propia

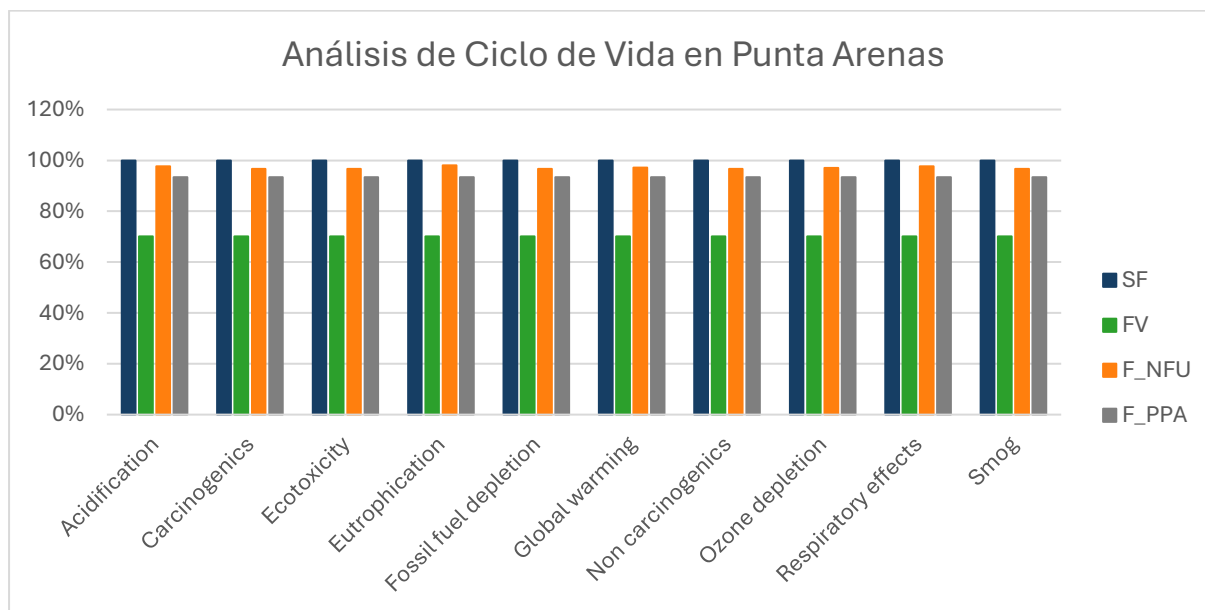


Figura 19. Impactos en Punta Arenas para 20 millones de EE

Fuente: Elaboración propia

A pesar de las previsiones iniciales, las cuales sugerían que los pavimentos con fibras recicladas tendrían un menor impacto sobre aquellos que poseían fibras comerciales, los resultados obtenidos evidencian una reducción significativa en la huella ecológica por parte de estos últimos casos. Esta aparente contradicción se explica mediante un análisis detallado del balance entre los impactos asociados a la producción de las fibras y los beneficios derivados de la reducción de las losas de hormigón.

En primer lugar, es cierto que la fabricación de fibras comerciales, como las fibras de acero, conlleva a un consumo energético considerable y la emisión de los gases de efecto invernadero asociados con el proceso de producción. No obstante, este impacto se ve atenuado por las propiedades estructurales mejoradas del hormigón una vez incorporadas las fibras a su mezcla. En particular, el uso de fibras permite reducir considerablemente el espesor del hormigón necesario para alcanzar las prestaciones deseadas, las cuales fueron estudiadas para 1 kilómetro de pavimento, lo que a su vez se traduce en una disminución del volumen total de material requerido, especialmente por parte del cemento.

Al analizar el caso de Concepción, los resultados anteriores evidencian un espesor inicial de 23.9 cm, el cual disminuye a 17.1 cm al incorporar fibras comerciales a la mezcla de hormigón. Esta reducción da como resultado que el hormigón requerido para la construcción de 1 kilómetro de pavimento disminuya de 181640 kg a 129960 kg. Al modelar estos dos procesos en OpenLCA, el programa nos indica que el impacto ambiental derivado al cemento se transforma de $1.63\text{e}5$ kg CO₂eq a $1.170\text{e}5$ kg CO₂eq. Por otro lado, el impacto asociado al cemento en los pavimentos que consideran fibras NFU fue de $1.608\text{e}5$ kg CO₂eq, mientras que en pavimentos que consideran fibras PPA fue de $1.52\text{e}5$ kg CO₂ eq.

Dicho de manera más acotada, aunque la producción de fibras comerciales implica un impacto ambiental adicional, este es compensado de manera significativa por los beneficios derivados de la optimización del uso del material y la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón. Este equilibrio resulta en una reducción del volumen total de hormigón necesario para la construcción de 1 kilómetro de pavimento y una mayor durabilidad de las estructuras, lo que permite que los pavimentos de hormigón

reforzados con fibras comerciales presenten un impacto ambiental inferior a los hormigones convencionales y los reforzados con fibras recicladas.

3.4.2. ACV DE PAVIMENTOS PARA 60 MILLONES DE EJES EQUIVALENTES

En las siguientes figuras se visualizan los resultados obtenidos mediante el software OpenLCA. En este, se modelaron los pavimentos sin la incorporación de fibras, como también los casos en que se incluían.

Cabe mencionar que se modeló para 60 millones de ejes equivalentes debido a que en todos los casos fue donde se encontraron los menores porcentajes de reducción en el espesor de las losas.

En el anexo 4 se encuentran las tablas cuyos datos fueron graficados en las siguientes figuras, junto con la dosificación empleada para el diseño de 1 km de pavimento en cada uno de los casos.

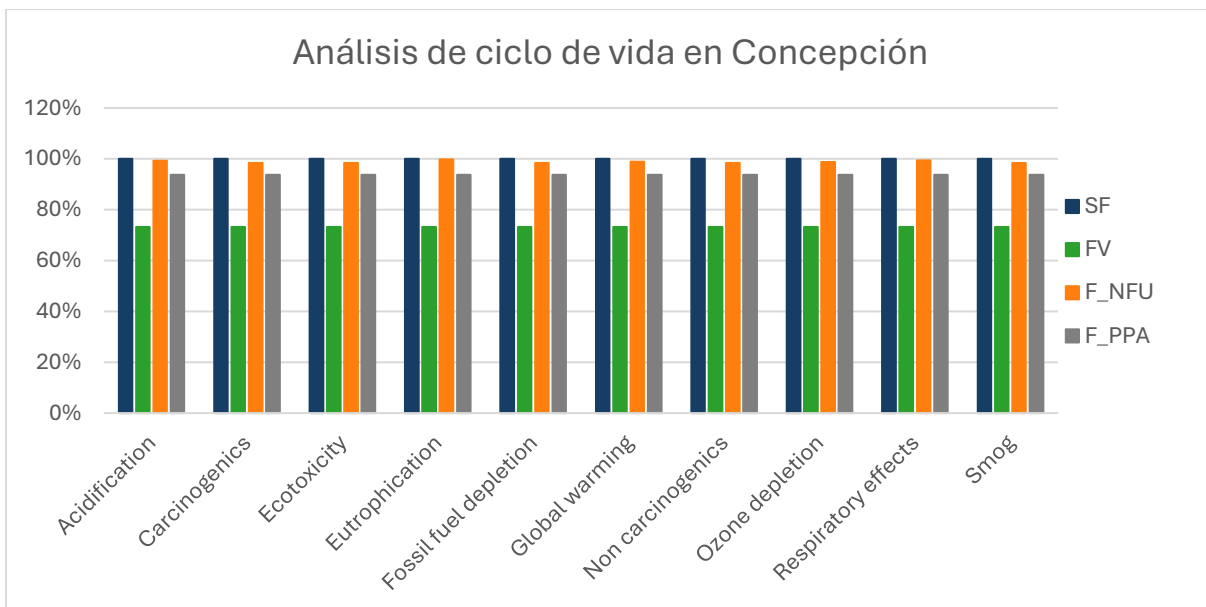


Figura 20. Impactos en Concepción para 60 millones de EE

Fuente: Elaboración propia

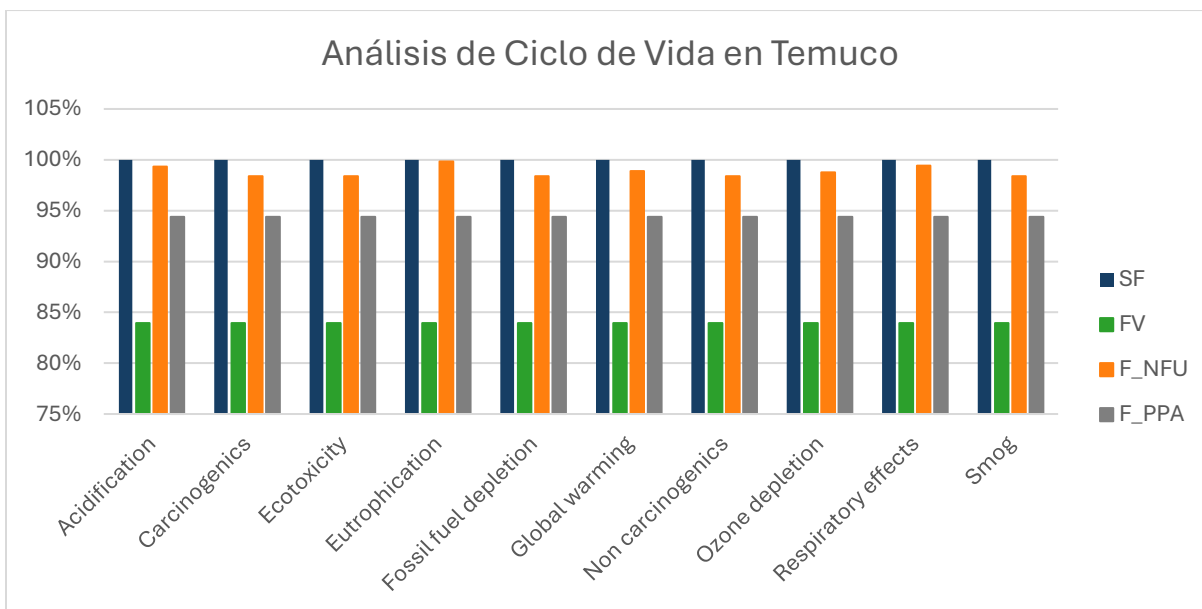


Figura 21. Impactos en Temuco para 60 millones de EE

Fuente: Elaboración propia

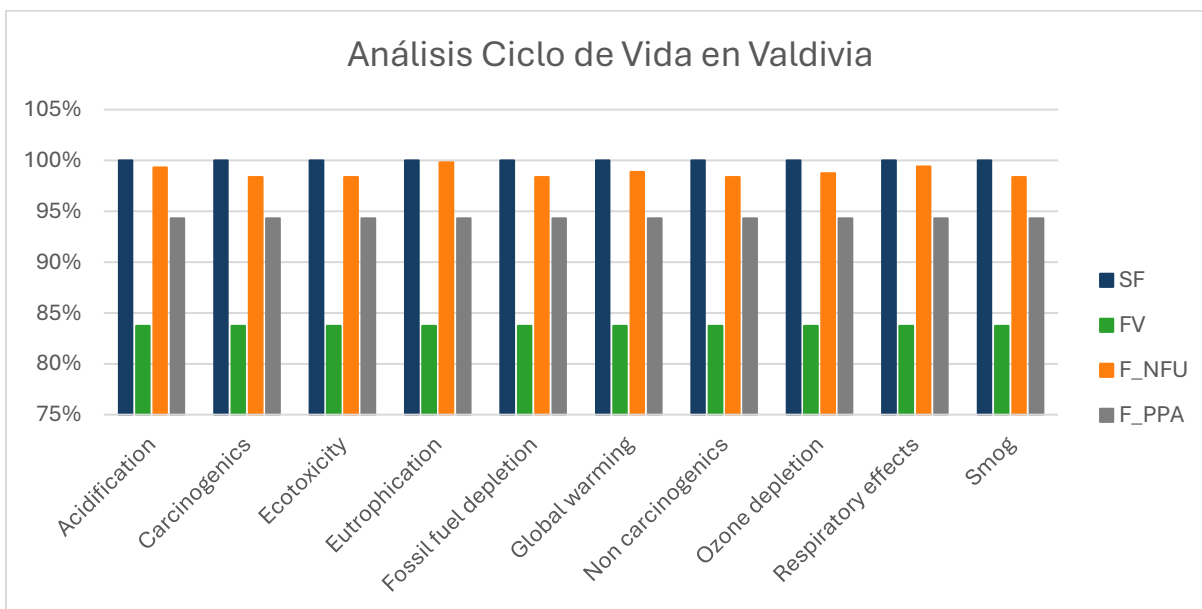


Figura 22. Impactos en Valdivia para 60 millones de EE

Fuente: Elaboración propia

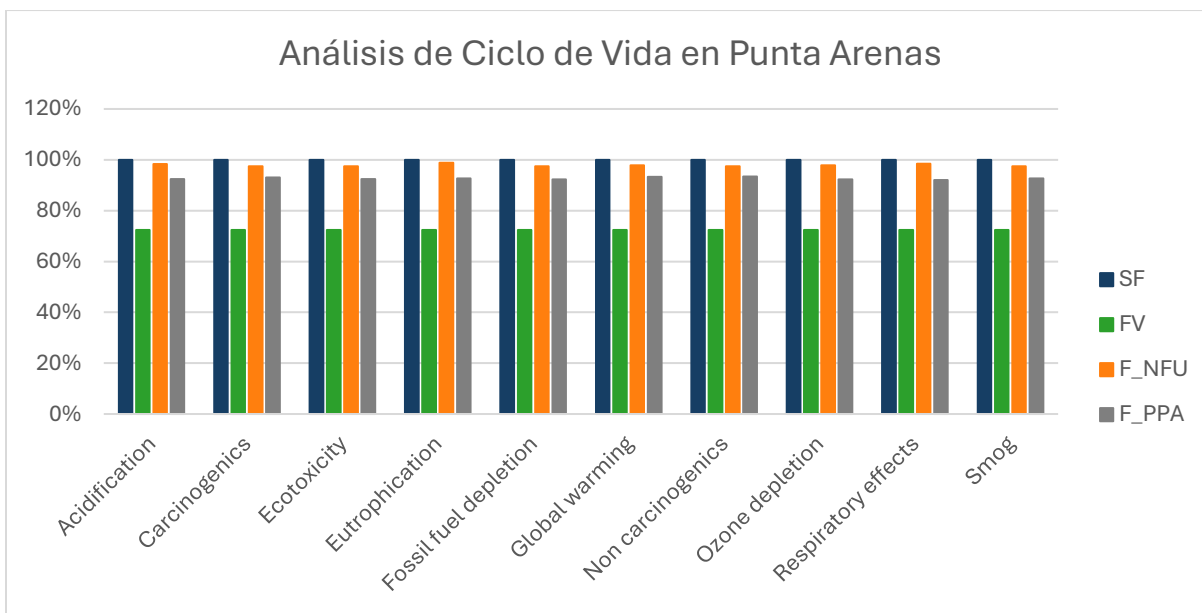


Figura 23. Impactos en Punta Arenas para 60 millones de EE

Fuente: Elaboración propia

Es posible observar que, aunque el porcentaje de disminución de espesor es menor, la tendencia respecto a cuál caso presenta un mayor número de impactos permanece inalterada. En particular, para el caso de Valdivia, los impactos para los pavimentos sin fibras son del 100%, con fibras comerciales 84%, con fibras NFU 98% aproximadamente y con fibras PPA el impacto es del 94%, tal como se detalla en el anexo 4.

Asimismo, al analizar específicamente el impacto asociado al uso de cemento, se identificó un valor de $1.68e5$ kgCO₂eq cuando no hay fibras involucradas, $1.41e5$ kgCO₂eq cuando se incorporan fibras comerciales, $1.66e5$ kgCO₂eq con fibras NFU y $1.59e5$ kgCO₂eq cuando se utilizan fibras PPA. Esta reducción en el impacto ambiental se debe a la disminución en el uso de cemento en la mezcla: de 186960 kg en el caso sin fibras a 156160 kg al incorporar fibras comerciales, 183920 kg con fibras NFU y 173320 kg al utilizar fibras PPA.

Se evidencia que, al reducir el espesor de la losa, aunque sea en menor medida, los impactos ambientales asociados disminuyen debido al menor uso de materiales en la construcción del pavimento.

3.4.3. ACV DE RECAPADOS PARA 20 MILLONES DE EJES EQUIVALENTES

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras realizar el análisis de ciclo de vida (ACV) aplicado a los recapados. Este análisis permite evaluar el comportamiento de los sistemas de pavimentación en distintas condiciones, considerando el caso específico de una proyección para 20 millones de ejes equivalentes. Para ello, se examinaron los diferentes espesores asociados a las ciudades de estudio.

En el anexo 5 se encuentran las tablas cuyos datos fueron graficados en las siguientes figuras, junto con la dosificación empleada para el diseño de 1 km de pavimento en cada uno de los casos.

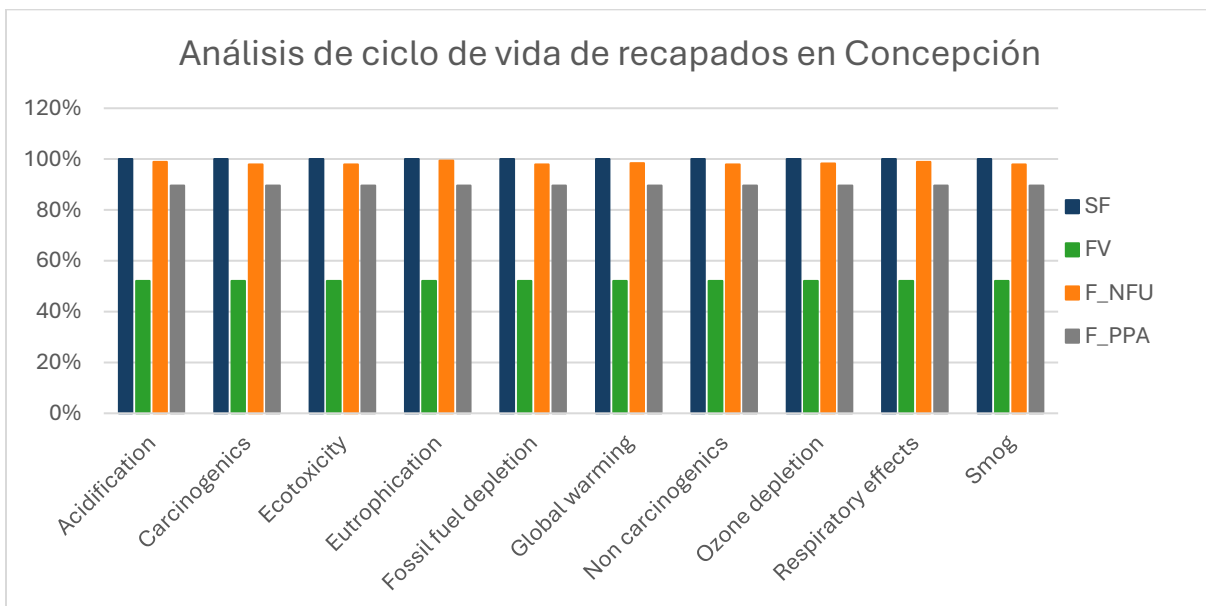


Figura 24. Impactos en recapados en Concepción

Fuente: Elaboración propia

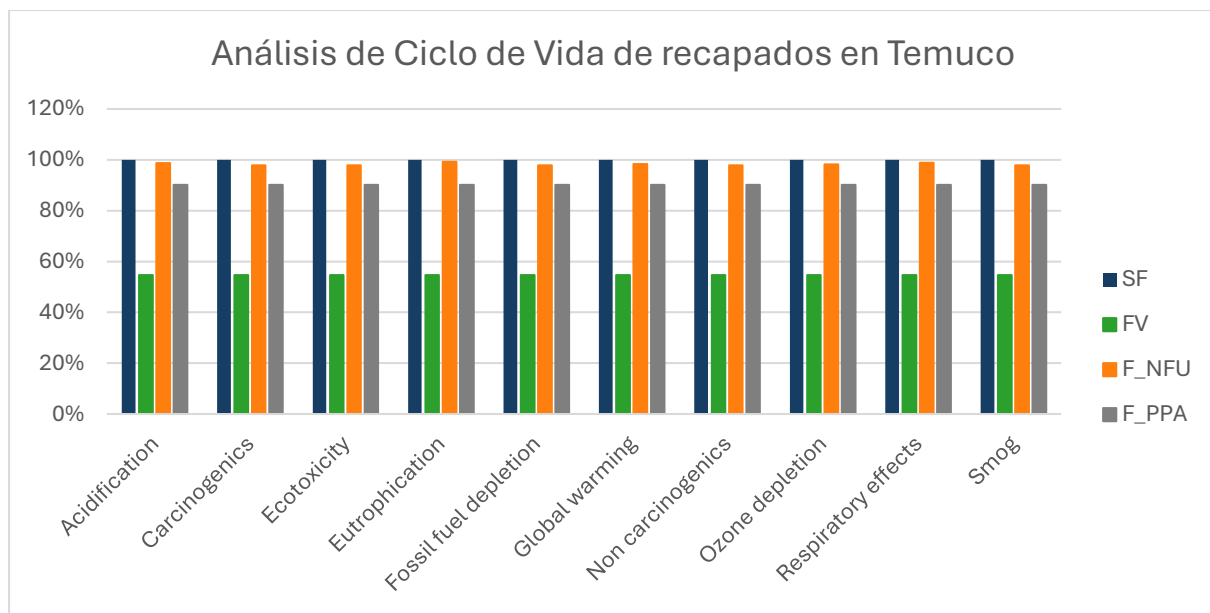


Figura 25. Impactos de recapados en Temuco

Fuente: Elaboración propia

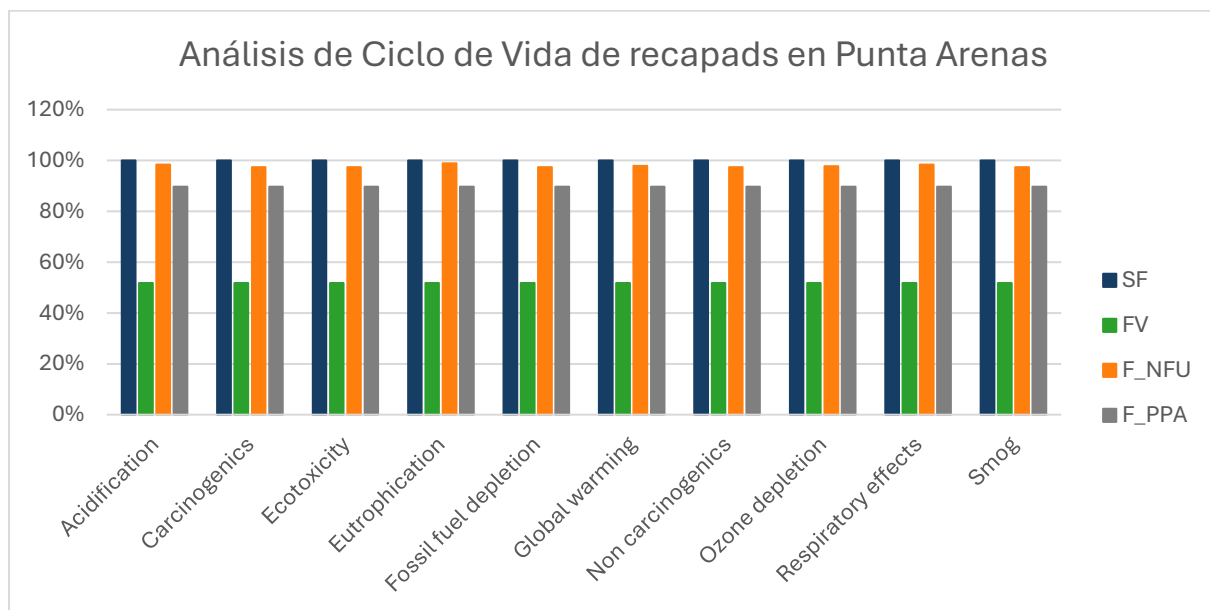


Figura 26. Impactos en recapados en Punta Arenas

Fuente: Elaboración propia

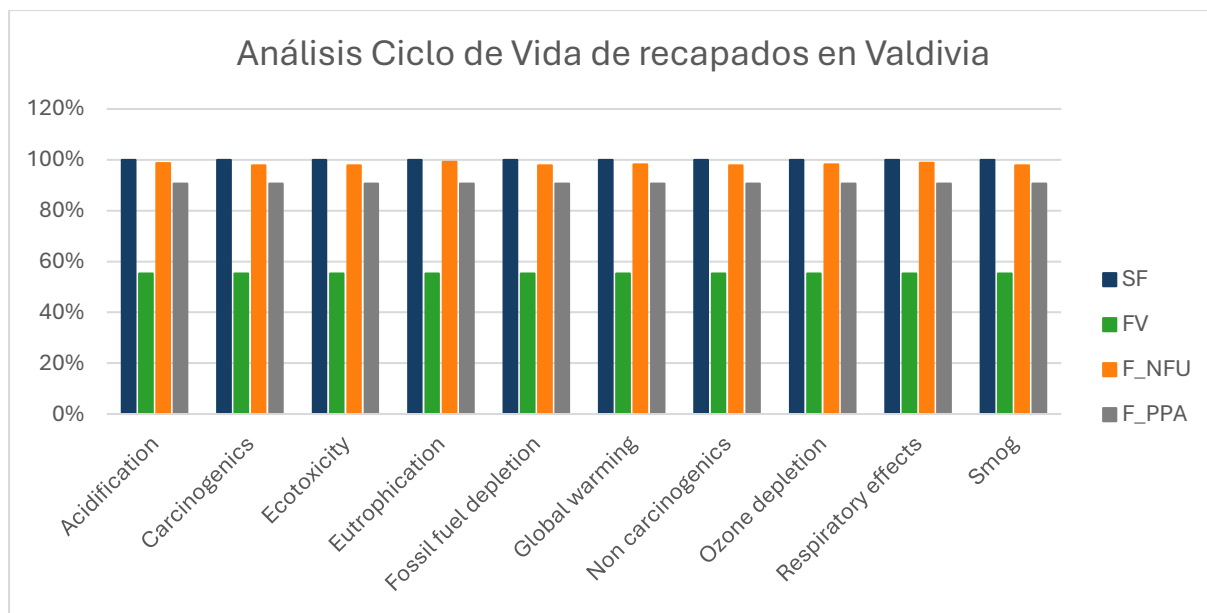


Figura 27. Impactos en recapados en Valdivia
Fuente: Elaboración propia

En el análisis de los impactos ambientales asociados a los sistemas de recapados se observa una tendencia que refleja los patrones previamente identificados en pavimentos. Como se ha señalado, los impactos asociados a los recapados dependen significativamente de factores, como lo es el espesor de las capas aplicadas y las características del material empleado, particularmente en relación al uso de cemento y la inclusión o no de refuerzos.

En los recapados, el espesor de la capa aplicada desempeña un papel muy importante, debido a que determina el volumen de material necesario para restaurar o mejorar la funcionalidad estructural de la superficie original. Un incremento en el espesor conlleva a un aumento proporcional al uso de cemento, lo cual intensifica los impactos ambientales debido a las emisiones y el consumo de recursos derivados de la fabricación del material. Sin embargo, la incorporación de fibras en las mezclas de hormigón genera beneficios en las propiedades mecánicas, lo cual permite la reducción del espesor requerido para alcanzar el mismo nivel de desempeño estructural y de durabilidad. De esta manera, los resultados obtenidos para los recapados permiten establecer paralelismos con las tendencias ya identificadas en los pavimentos.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

La industria de la construcción se posiciona como una de las principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global, en gran parte debido a la fabricación de materiales utilizados en ese sector. Entre estos, la producción de cemento, esencial en la elaboración de hormigón, representa una fuente significativa en las emisiones de dióxido de carbono. En este marco, el presente estudio se orientó a evaluar cómo la incorporación de fibras metálicas, tanto de origen comercial como reciclado, puede contribuir a reducir los impactos ambientales asociados a los pavimentos y sistemas de recapado.

Los resultados obtenidos a lo largo del estudio revelan que la adición de fibras metálicas no solo mejora las propiedades mecánicas del hormigón, sino que también permite una reducción significativa en el espesor de las losas. Este aspecto es relevante, ya que se traduce directamente en un menor consumo de materiales y, por ende, en una disminución del impacto ambiental asociado a su producción. En particular, se observó que el uso de fibras comerciales incrementó la resistencia a la flexocompresión del hormigón en un 43%, mientras que las fibras recicladas provenientes de neumáticos fuera de uso (NFU) y desechos del procesamiento de acero (PPA) mostraron mejoras del 2% y 7%, respectivamente. Estos resultados indican que el uso de fibras metálicas optimiza el diseño estructural, lo que se traduce en una mayor durabilidad y resistencia frente a cargas pesadas y repetitivas, lo que posteriormente se verá reflejado en una reducción del espesor necesario para resistir la misma capacidad estructural que un pavimento convencional.

Por otro lado, la investigación hace un análisis ambiental mediante el uso de materiales reciclados. La incorporación de fibras recicladas no solo contribuye a mejorar las propiedades mecánicas del hormigón, sino que también promueve un modelo de economía circular al reducir la cantidad de residuos generados por la industria. En el caso más favorable analizado en Concepción, se logró una reducción del espesor del 28%, lo cual representa un avance significativo hacia prácticas más sostenibles.

Por otro lado, en los resultados obtenidos en el diseño de los recapados se evidencia que la adición de las fibras aumenta la vida útil del pavimento en al menos un 100% de lo que soportaba originalmente. Es decir, si el pavimento resistía 20 millones de ejes equivalentes, con la incorporación de fibras resiste al menos 20 millones de ejes equivalentes más, todo dependiendo del caso en donde se encuentre.

Por último, el análisis de ciclo de vida de los pavimentos evidenció que los pavimentos reforzados con fibras comerciales presentan una mayor reducción en los impactos ambientales globales, a pesar de los efectos asociados a la producción del acero. En particular, se observó una disminución significativa en los impactos relacionados con el uso de cemento, con reducciones que varían entre un 10 y un 30%, dependiendo de las características de cada ciudad y las condiciones de tráfico evaluadas. Por su parte, las fibras NFU contribuyeron con una reducción aproximada del 3%, mientras que las fibras PPA lograron una disminución que varía entre el 6 y 8%. Estos resultados destacan el potencial de las fibras, especialmente las comerciales, para optimizar el desempeño ambiental de los pavimentos.

REFERENCIAS

Altoubat, Salah A Roesler, Lange, J. R., Rieder, D. A., & Klaus-Alexander. (2008). Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers. *Contraction and Building Materials*, 10.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*.

Arequipa, A. (2023, September 7). *¿Cómo las fibras de polipropileno están transformando obras de construcción globales?* Construyendo Seguro. <https://www.construyendoseguro.com/como-las-fibras-de-polipropileno-estan-transformando-obras-de-construccion-globales/>

Blanco, A., Pujadas, P., De la Fuente, A., Cavalaro, S. H. P., & Aguado, A. (2016). Influence of the Type of Fiber on the Structural Response and Design of FRC Slabs. *Journal of Structural Engineering*.

Cesar, A., & Pradena, M. (2020). Sustainable Engineering: Load Transfer Characterization for the Structural Design of Thinner Concrete Pavements. *MDPI*.

Córdova, D. E., & Turpo, E. (2019). *Efecto de la adición de fibras de acero reciclado en las propiedades mecánicas a compresión, tracción y flexión del concreto $F_c=210$ kg/cm²*, Lima 2019. Universidad César Vallejos.

Fibras y Mallas. (2019). Fibras y Mallas | Calidad Alemana en Sistemas Constructivos. <https://fibrasymallas.com/>

García, E., Pradena, M., Schwarz, A., César, A., Urbano, B., & Medina, C. (2024). Environmental evaluation of concrete applications with recycled material from tyres. *Engineering Sustainability*. <https://doi.org/10.1680/jensu.22.00083>

IECA. (2024). *Pavimentos de hormigón en paradas de autobús*. CEMENTOHORMIGON. https://cemento-hormigon.com/guias_tecnicas/pavimentos-de-hormigon-en-paradas-de-autobus/

Jamieson, S., White, G., & Verstraten, L. (2024). Principles for Incorporating Recycled Materials into Airport Pavement Construction for More Sustainable Airport Pavements. *Sustainability*.

Javaid, A., Ram, E. R. S., & Sharma, D. R. P. (2020). Strength Characteristics using crumb rubber and steel fiber in rigid pavement. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 07, 14.

Mohod, M. V., & Kadam, K. N. (2021). *Fatigue Resistance of Recycled Steel Fibers (Discarded Vehicle Tyre Steel Fibers) Concrete Pavement*. Springer Nature.

MOP. (2023). *Manual de Carreteras, Volumen 3*.

Nacional Concrete Pavement Technology Center. (2007). *Guide to Concrete Overlay Solutions*. https://www.concreteparking.org/downloads/guide_concrete_overlays.pdf

Nazer, A., Honores, A., Chulak, P., & Pavez, O. (2018). HORMIGÓN SUSTENTABLE BASADO EN FIBRAS DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO. *Revista Internacional de Contaminación*, 7.

Organización Internacional de Normalización. (2006). *Gestión Ambiental – Análisis del ciclo de vida – Principios y marco de referencia (ISO 14040)*.

Serafini, S., & Ciroth, A. (2024). *TRACI 2.2 method documentation*.

UNECE. (2022). *COP27: UN report shows pathways to carbon-neutrality in “energy intensive” steel, chemicals and cement industries*. <https://unece.org/media/press/372890>

Vogtländer, J. G. (2023). *A practical guide for students, designers and business managers LCA*.

ANEXO 1. DISEÑO DE PAVIMENTOS

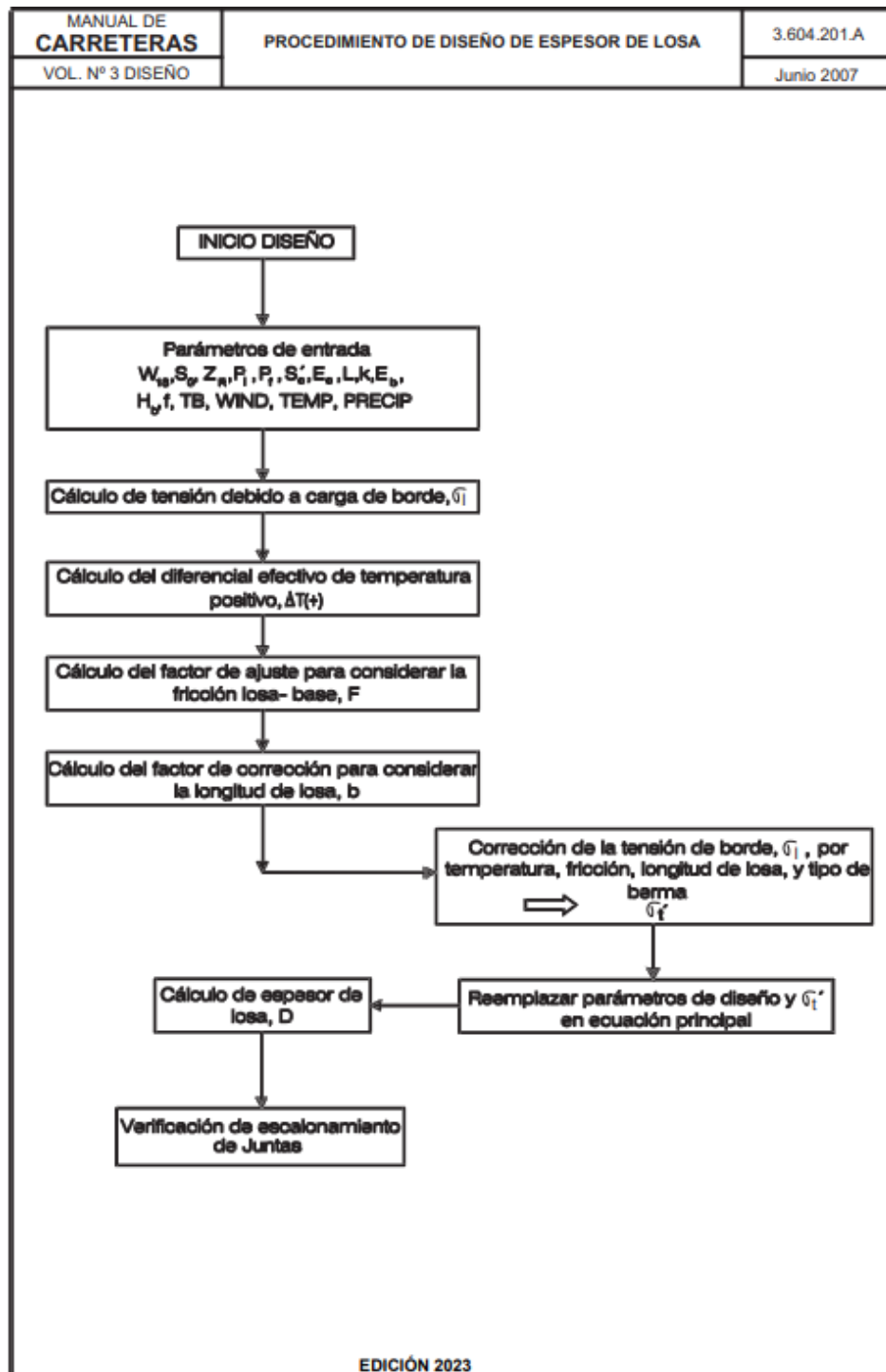


Figura 28. Resumen del diseño de pavimentos

Fuente: Manual de Carreteras (2023)

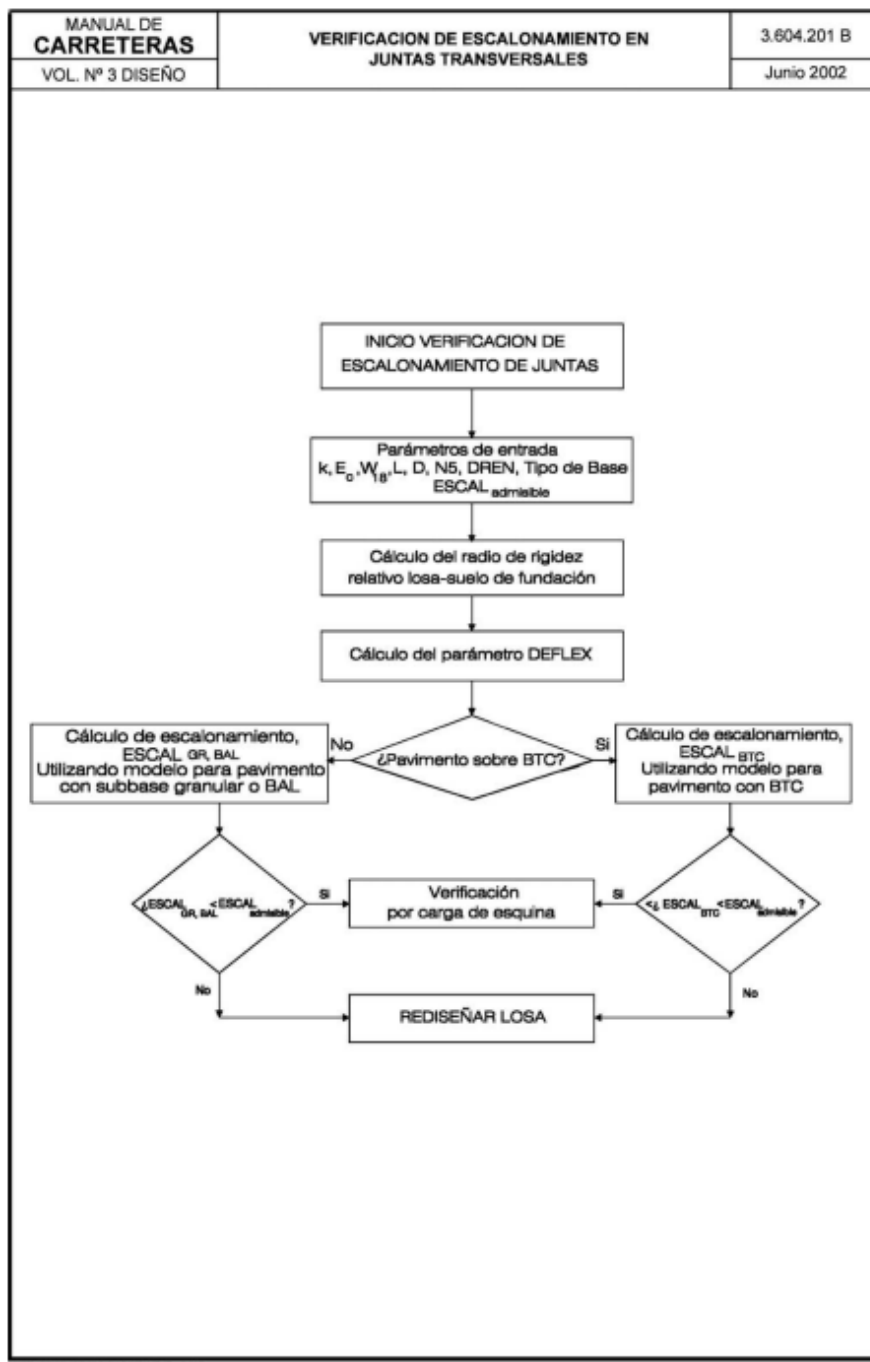


Figura 29. Verificación por escalonamiento
Fuente: Manual de Carreteras (2023)

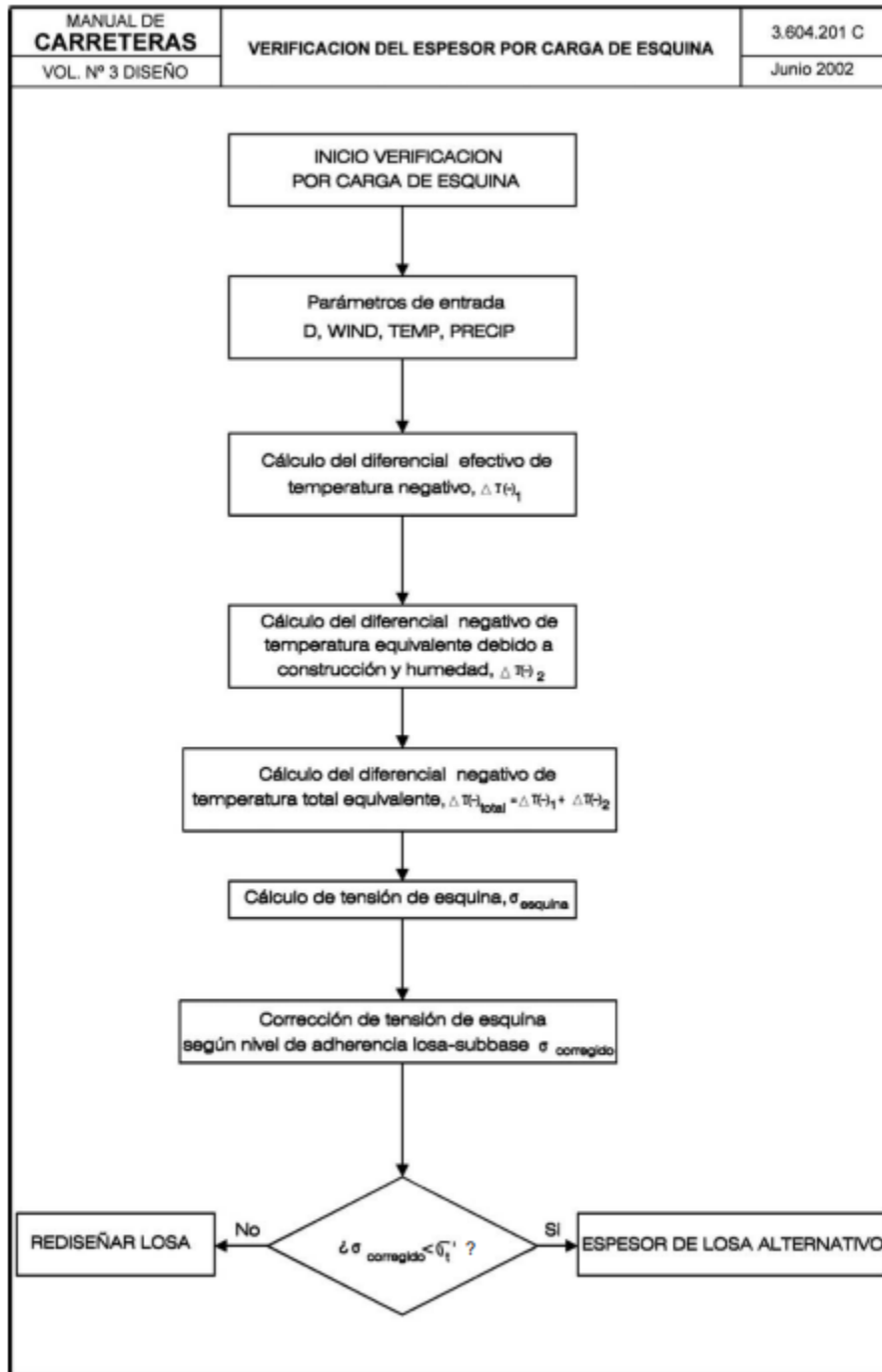


Figura 30. Verificación por carga de esquina
 Fuente: Manual de Carreteras (2023)

ANEXO 2. DISEÑO DE RECAPADOS

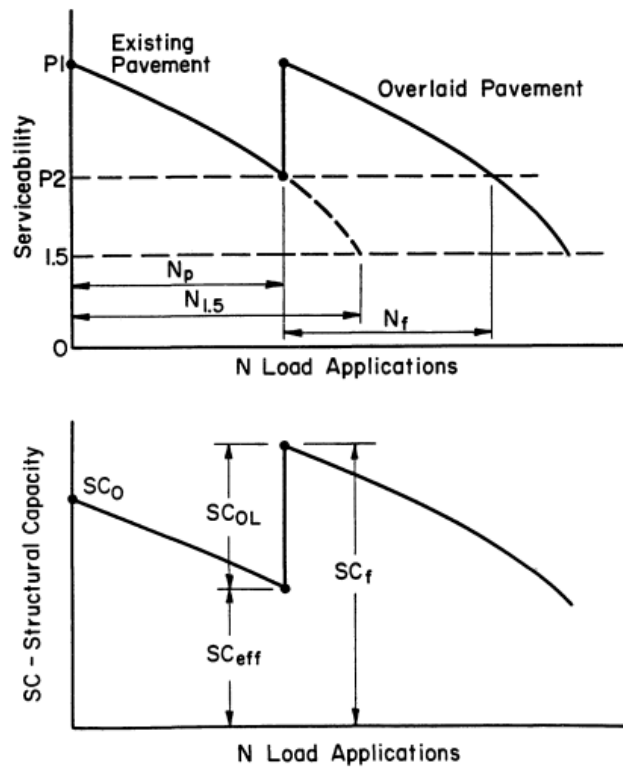


Figura 31. Ilustración del funcionamiento de recapados

Fuente: AASHTO (1993)

ANEXO 3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS PARA 20 MILLONES EE

- Concepción

Tabla 13. Impactos en Concepción para 20 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_C	P_FV_C	P_FR_C	P_V_C
Acidification	kg SO2 eq	455.9650353	326.2343976	452.6382009	425.4401793
Carcinogenics	CTUh	7.70056E-05	5.50961E-05	7.57168E-05	7.18504E-05
Ecotoxicity	CTUe	3086.375603	2208.243632	3034.720781	2879.756316
Eutrophication	kg N eq	16.81702221	12.03226275	16.77812191	15.69119646
Fossil fuel depletion	MJ surplus	54883.02845	39267.77349	53964.48404	51208.85081
Global warming	kg CO2 eq	166119.8405	118855.6181	164144.1177	154998.847
Non carcinogens	CTUh	0.004690719	0.003356121	0.004612213	0.004376696
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.010638744	0.007611821	0.010501275	0.009926527
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	25.55725787	18.2857368	25.39256676	23.84631174
Smog	kg O3 eq	5726.400836	4097.131979	5630.561491	5343.043458

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Impactos en Concepción en % para 20 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_C	P_FV_C	P_FR_C	P_V_C
Acidification	kg SO2 eq	100%	72%	99,3%	93%
Carcinogenics	CTUh	100%	72%	98,3%	93%
Ecotoxicity	CTUe	100%	72%	98,3%	93%
Eutrophication	kg N eq	100%	72%	99,8%	93%
Fossil fuel depletion	MJ surplus	100%	72%	98,3%	93%
Global warming	kg CO2 eq	100%	72%	98,8%	93%
Non Carcinogenics	CTUh	100%	72%	98,3%	93%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	100%	72%	98,7%	93%
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	100%	72%	99,4%	93%
Smog	kg O3 eq	100%	72%	98,3%	93%

Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Dosificaciones para pavimentos en Concepción

DOSIFICACIONES					
	Cemento (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)
S/F	181640	535360	308310	95600	-
C/FV	129960	383040	220590	68400	9396
C/FNFU	178600	526400	303150	94000	18448
C/FPPA	169480	499520	287670	89200	17506

Fuente: Elaboración propia

- Temuco

Tabla 15. Impactos en Temuco para 20 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_T	P_FV_T	P_FR_T	P_V_T
Acidification	kg SO2 eq	373.929485	324.9122926	369.8149454	341.4968256
Carcinogenics	CTUh	6.3151E-05	5.49517E-05	6.18622E-05	5.76736E-05
Ecotoxicity	CTUe	2531.086269	2199.385745	2479.431447	2311.553276
Eutrophication	kg N eq	13.7913655	11.98920646	13.70807721	12.59517563
Fossil fuel depletion	MJ surplus	45008.67605	39094.84286	44090.13164	41104.86231
Global warming	kg CO2 eq	136232.1705	118618.4366	134109.2188	124416.1149
Non Carcinogenics	CTUh	0.003846782	0.003350175	0.003768276	0.003513132
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.00872466	0.00758033	0.008579764	0.007967929
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	20.95909014	18.19276801	20.74626148	19.4120987
Smog	kg O3 eq	4696.127882	4082.073491	4600.288538	4288.810668

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Impactos en Temuco en % para 20 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_T	P_FV_T	P_FR_T	P_V_T
Acidification	kg SO2 eq	100%	87%	98,9%	91%
Carcinogenics	CTUh	100%	87%	98,0%	91%
Ecotoxicity	CTUe	100%	87%	98,0%	91%
Eutrophication	kg N eq	100%	87%	99,4%	91%
Fossil fuel depletion	MJ surplus	100%	87%	98,0%	91%
Global warming	kg CO2 eq	100%	87%	98,4%	91%
Non Carcinogenics	CTUh	100%	87%	98,0%	91%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	100%	87%	98,3%	91%
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	100%	87%	99,0%	91%
Smog	kg O3 eq	100%	87%	98,0%	91%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Dosificaciones para pavimentos en Temuco

DOSIFICACIONES					
	Cemento (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)
S/F	148960	439040	252840	78400	-
C/FV	120840	356160	205110	63600	8737
C/FNFU	145920	430080	247680	76800	15072
C/FPPA	136040	400960	230910	71600	14052

Fuente: Elaboración propia

- Valdivia

Tabla 18. Impactos en Valdivia para 20 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_V	P_FV_V	P_FR_V	P_V_V
Acidification	kg SO2 eq	366.298271	299.5251487	360.1844645	330.0500046
Carcinogenics	CTUh	6.18622E-05	5.05853E-05	6.02512E-05	5.57405E-05
Ecotoxicity	CTUe	2479.431447	2027.451756	2414.862919	2234.071043
Eutrophication	kg N eq	13.50990906	11.04716522	13.35110261	12.17299097
Fossil fuel depletion	MJ surplus	44090.13164	36052.86806	42941.95113	39727.0457
Global warming	kg CO2 eq	133451.9221	109124.7488	130616.813	120245.7423
Non carcinogenics	CTUh	0.003768276	0.003081351	0.003670144	0.003395374
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.008546606	0.006988631	0.008356334	0.007700848
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	20.5313536	16.78865894	20.20600139	18.49960507
Smog	kg O3 eq	4600.288538	3761.694273	4480.489357	4145.051651

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Impactos en Valdivia en % para 20 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_V	P_FV_V	P_FR_V	P_V_V
Acidification	kg SO2 eq	100%	82%	98,3%	90%
Carcinogenics	CTUh	100%	82%	97,4%	90%
Ecotoxicity	CTUe	100%	82%	97,4%	90%
Eutrophication	kg N eq	100%	82%	98,8%	90%
Fossil fuel depletion	MJ surplus	100%	82%	97,4%	90%
Global warming	kg CO2 eq	100%	82%	97,9%	90%
Non carcinogenics	CTUh	100%	82%	97,4%	90%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	100%	82%	97,8%	90%
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	100%	82%	98,4%	90%
Smog	kg O3 eq	100%	82%	97,4%	90%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Dosificaciones para pavimentos en Valdivia

DOSIFICACIONES					
	Cemento (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)
S/F	145920	430080	247680	76800	-
C/FV	119320	351680	202530	62800	8627
C/FNFU	142120	418880	241230	74800	14680
C/FPPA	131480	387520	223170	69200	13581

Fuente: Elaboración propia

- Punta Arenas

Tabla 21. Impactos en Punta Arenas para 20 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_PA	P_FV_PA	P_FR_PA	P_V_PA
Acidification	kg SO2 eq	459.7806423	322.4187906	448.7859619	429.2557863
Carcinogenics	CTUh	7.765E-05	5.44517E-05	7.50724E-05	7.24948E-05
Ecotoxicity	CTUe	3112.203014	2182.416221	3008.89337	2905.583727
Eutrophication	kg N eq	16.95775043	11.89153454	16.63532944	15.83192468
Fossil fuel depletion	MJ surplus	55342.30066	38808.50129	53505.21184	51668.12302
Global warming	kg CO2 eq	167509.9647	117465.4939	162747.1467	156388.9712
Non carcinogenics	CTUh	0.004729972	0.003316868	0.00457296	0.004415949
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.010727771	0.007522794	0.010411903	0.010015554
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	25.77112614	18.07186854	25.17645987	24.06018
Smog	kg O3 eq	5774.320508	4049.212307	5582.641819	5390.96313

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Impactos en Punta Arenas en % para 20 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_PA	P_FV_PA	P_FR_PA	P_V_PA
Acidification	kg SO2 eq	100%	70%	97,6%	93%
Carcinogenics	CTUh	100%	70%	96,7%	93%
Ecotoxicity	CTUe	100%	70%	96,7%	93%
Eutrophication	kg N eq	100%	70%	98,1%	93%
Fossil fuel depletion	MJ surplus	100%	70%	96,7%	93%
Global warming	kg CO2 eq	100%	70%	97,2%	93%
Non carcinogenics	CTUh	100%	70%	96,7%	93%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	100%	70%	97,1%	93%
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	100%	70%	97,7%	93%
Smog	kg O3 eq	100%	70%	96,7%	93%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Dosificaciones para pavimentos en Punta Arenas

DOSIFICACIONES					
	Cemento (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)
S/F	183160	539840	310890	96400	-
C/FV	128440	378560	218010	67600	9287
C/FNFU	177080	521920	300570	93200	18291
C/FPPA	171000	504000	290250	90000	17663

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS PARA 60 MILLONES EE

- Concepción

Tabla 24. Impactos en Concepción para 60 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_C	P_FV_C	P_FR_C	P_V_C
Acidification	kg SO2 eq	583.7878694	427.3479828	579.7620884	547.539603
Carcinogenics	CTUh	9.85929E-05	7.21726E-05	9.69819E-05	9.24712E-05
Ecotoxicity	CTUe	3951.593868	2892.670021	3887.025341	3706.233465
Eutrophication	kg N eq	21.53141756	15.76156057	21.49027345	20.19449948
Fossil fuel depletion	MJ surplus	70268.64731	51438.48692	69120.46679	65905.56136
Global warming	kg CO2 eq	212689.0008	155693.9091	210244.1617	199482.821
Non carcinogenics	CTUh	0.00600569	0.004396322	0.005907558	0.005632788
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.013621153	0.00997104	0.013450569	0.012775395
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	32.7218448	23.95324587	32.52409414	30.69009627
Smog	kg O3 eq	7331.709857	5367.003294	7211.910676	6876.47297

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Impactos en Concepción en % para 60 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_C	P_FV_C	P_FR_C	P_V_C
Acidification	kg SO2 eq	100%	73%	99,3%	94%
Carcinogenics	CTUh	100%	73%	98,4%	94%
Ecotoxicity	CTUe	100%	73%	98,4%	94%
Eutrophication	kg N eq	100%	73%	99,8%	94%
Fossil fuel depletion	MJ surplus	100%	73%	98,4%	94%
Global warming	kg CO2 eq	100%	73%	98,9%	94%
Non carcinogenics	CTUh	100%	73%	98,4%	94%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	100%	73%	98,7%	94%
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	100%	73%	99,4%	94%
Smog	kg O3 eq	100%	73%	98,4%	94%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Dosificación para Concepción

DOSIFICACIONES					
	Cemento (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)
S/F	232560	685440	394740	122400	-
C/FV	170240	501760	288960	89600	12309
C/FNFU	228760	674240	388290	120400	23629
C/FPPA	218120	642880	370230	114800	22530

Fuente: Elaboración propia

- Temuco

Tabla 27. Impactos en Temuco para 60 millones de EE

Impact category	Reference unit	P_SF_T	P_FV_T	P_FR_T	P_V_T
Acidification	kg SO2 eq	475.0430702	398.7788672	471.8991922	448.3338213
Carcinogenics	CTUh	8.02276E-05	6.73479E-05	7.89388E-05	7.57168E-05
Ecotoxicity	CTUe	3215.512657	2699.289121	3163.856573	3034.720781
Eutrophication	kg N eq	17.52066331	14.70787962	17.4920771	16.53556577
Fossil fuel depletion	MJ surplus	57179.38947	47999.68472	56260.81602	53964.48404
Global warming	kg CO2 eq	173070.4615	145285.9856	171128.9484	163339.5921
Non carcinogenics	CTUh	0.004886983	0.004102436	0.004808477	0.004612213
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.01108388	0.009304454	0.010948134	0.01046069
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	26.6265992	22.35187885	26.47308638	25.12952134
Smog	kg O3 eq	5965.999197	5008.211218	5870.157286	5630.561491

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Impactos en Temuco en % para 60 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_T	P_FV_T	P_FR_T	P_V_T
Acidification	kg SO2 eq	100%	84%	99,3%	94%
Carcinogenics	CTUh	100%	84%	98,4%	94%
Ecotoxicity	CTUe	100%	84%	98,4%	94%
Eutrophication	kg N eq	100%	84%	99,8%	94%
Fossil fuel depletion	MJ surplus	100%	84%	98,4%	94%
Global warming	kg CO2 eq	100%	84%	98,9%	94%
Non carcinogenics	CTUh	100%	84%	98,4%	94%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	100%	84%	98,8%	94%
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	100%	84%	99,4%	94%
Smog	kg O3 eq	100%	84%	98,4%	94%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Dosificación en Temuco

DOSIFICACIONES					
	Cemento (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)
S/F	189240	557760	321210	99600	-
C/FV	158840	468160	269610	83600	11485
C/FNFU	186200	548800	316050	98000	19233
C/FPPA	178600	526400	303150	94000	18448

Fuente: Elaboración propia

- Valdivia

Tabla 30. Impactos en Valdivia para 60 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_V	P_FV_V	P_FR_V	P_V_V
Acidification	kg SO2 eq	469.3196597	393.0075199	466.1209208	442.6104108
Carcinogenics	CTUh	7.9261E-05	6.6373E-05	7.79722E-05	7.47502E-05
Ecotoxicity	CTUe	3176.771541	2660.223323	3125.116719	2995.979665
Eutrophication	kg N eq	17.30957098	14.49500659	17.27788899	16.32447345
Fossil fuel depletion	MJ surplus	56490.48117	47305.03708	55571.93676	53275.57574
Global warming	kg CO2 eq	170985.2752	143182.7914	169033.4945	161254.4059
Non carcinogenics	CTUh	0.004828104	0.004043046	0.004749598	0.004553334
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.010950339	0.009169796	0.010814078	0.010327149
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	26.3057968	22.02843147	26.14893374	24.80871894
Smog	kg O3 eq	5894.119689	4935.726244	5798.280344	55508.681983

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Impactos en Valdivia en % para 60 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_V	P_FV_V	P_FR_V	P_V_V
Acidification	kg SO2 eq	100%	84%	99,3%	94%
Carcinogenics	CTUh	100%	84%	98,4%	94%
Ecotoxicity	CTUe	100%	84%	98,4%	94%
Eutrophication	kg N eq	100%	84%	99,8%	94%
Fossil fuel depletion	MJ surplus	100%	84%	98,4%	94%
Global warming	kg CO2 eq	100%	84%	98,9%	94%
Non carcinogenics	CTUh	100%	84%	98,4%	94%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	100%	84%	98,8%	94%
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	100%	84%	99,4%	94%
Smog	kg O3 eq	100%	84%	98,4%	94%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Dosificación en Valdivia

DOSIFICACIONES					
	Cemento (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)
S/F	186960	551040	317340	98400	-
C/FV	156560	461440	265740	82400	11320
C/FNFU	183920	542080	312180	96800	18997
C/FPPA	176320	519680	299280	92800	18212

Fuente: Elaboración propia

- Punta Arenas

Tabla 33. Impactos en Punta Arenas para 60 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_PA	P_FV_PA	P_FR_PA	P_V_PA
Acidification	kg SO2 eq	587.6034764	42.4401793	577.8358522	543.329895
Carcinogenics	CTUh	9.92373E-05	7.18504E-05	9.66597E-05	9.23599E-05
Ecotoxicity	CTUe	3977.421279	2879.56316	3874.111635	3676.754126
Eutrophication	kg N eq	21.67214578	15.69119646	21.41887065	20.09770315
Fossil fuel depletion	MJ surplus	70727.91951	51208.85081	68890.83069	65320.99644
Global warming	kg CO2 eq	214079.125	154998.847	209545.6544	199854.596
Non carcinogenics	CTUh	0.006044943	0.004376696	0.005887932	0.005648392
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0,01371018	0.009926527	0.013405882	0.012659932
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	32.93571307	23.84631174	32.41603357	30.29963906
Smog	kg O3 eq	7379.629529	5343.043458	7187.95084	6841.220472

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Impactos en Punta Arenas en % para 60 millones EE

Impact category	Reference unit	P_SF_PA	P_FV_PA	P_FR_PA	P_V_PA
Acidification	kg SO2 eq	100%	72%	98,3%	92%
Carcinogenics	CTUh	100%	72%	97,4%	93%
Ecotoxicity	CTUe	100%	72%	97,4%	92%
Eutrophication	kg N eq	100%	72%	98,8%	93%
Fossil fuel depletion	MJ surplus	100%	72%	97,4%	92%
Global warming	kg CO2 eq	100%	72%	97,9%	93%
Non carcinogenics	CTUh	100%	72%	97,4%	93%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	100%	72%	97,8%	92%
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	100%	72%	98,4%	92%
Smog	kg O3 eq	100%	72%	97,4%	93%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35. Dosificación en Punta Arenas

DOSIFICACIONES					
	Cemento (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)
S/F	189240	557760	321210	99600	-
C/FV	158840	468160	269610	83600	11485
C/FNFU	186200	548800	316050	98000	19233
C/FPPA	178600	526400	303150	94000	18448

Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 5. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA RECAPADOS

- Concepción

Tabla 36. Impactos ambientales de recapados en Concepción

Impact category	Reference unit	R_SF_C	P_FV_C	R_FNFU_C	P_FPPA_C
Acidification	kg SO2 eq	366.298271	190.7803495	362.1104674	328.1422011
Carcinogenics	CTUh	6.18622E-05	3.22199E-05	6.05734E-05	5.54183E-05
Ecotoxicity	CTUe	2479.431447	1291.370545	2427.776625	2221.157338
Eutrophication	kg N eq	13.50990906	7.036410968	13.42249227	12.10262686
Fossil fuel depletion	MJ surplus	44090.13164	22963.61023	43171.58723	39497.4096
Global warming	kg CO2 eq	133451.9221	69506.20942	131315.2767	119550.6802
Non carcinogenics	CTUh	0.003768276	0.001962644	0.00368977	0.003375747
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.008546606	0.004451357	0.008401019	0.007656334
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	20.5313536	10.69341333	20.3140477	18.39267094
Smog	kg O3 eq	4600.288538	2395.983613	4504.449193	4121.091815

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Impactos ambientales en % de recapados en Concepción

Impact category	Reference unit	P_SF_C	P_FV_C	P_FR_C	P_V_C
Acidification	kg SO2 eq	100%	52%	98,9%	90%
Carcinogenics	CTUh	100%	52%	97,9%	90%
Ecotoxicity	CTUe	100%	52%	97,9%	90%
Eutrophication	kg N eq	100%	52%	99,4%	90%
Fossil fuel depletion	MJ surplus	100%	52%	97,9%	90%
Global warming	kg CO2 eq	100%	52%	98,4%	90%
Non carcinogenics	CTUh	100%	52%	97,9%	90%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	100%	52%	98,3%	90%
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	100%	52%	98,9%	90%
Smog	kg O3 eq	100%	52%	97,9%	90%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38. Dosificación de recapados en Concepción

DOSIFICACIONES					
	Cemento (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)
S/F	145920	430080	247680	76800	-
C/FV	76000	224000	129000	40000	5495
C/FNFU	142880	421120	242520	75200	14758
C/FPPA	130720	385280	221880	68800	13502

Fuente: Elaboración propia

- Valdivia

Tabla 39. Impactos ambientales de recapados en Valdivia

Impact category	Reference unit	R_SF_V	R_FV_V	R_FNFU_V	R_FPPA_V
Acidification	kg SO2 eq	345.3124326	190.7803495	340.9232695	312.8797732
Carcinogenics	CTUh	5.8318E-05	3.22199E-05	5.70292E-05	5.28407E-05
Ecotoxicity	CTUe	2337.380687	1291.370545	2285.725865	2117.847694
Eutrophication	kg N eq	12.73590385	7.036410968	12.63714025	11.53971399
Fossil fuel depletion	MJ surplus	41564.13452	22963.61023	40645.59011	37660.32078
Global warming	kg CO2 eq	125806.2391	69506.20942	123631.9579	113990.1835
Non carcinogenics	CTUh	0.003552385	0.001962644	0.00347388	0.003218736
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.008056957	0.004451357	0.007909471	0.007300226
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	19.35507814	10.69341333	19.12546693	17.53719787
Smog	kg O3 eq	4336.73034	2395.983613	4240.890996	3929.413126

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40. Impactos ambientales en % de recapados en Valdivia

Impact category	Reference unit	P_SF_V	P_FV_V	P_FR_V	P_V_V
Acidification	kg SO2 eq	100%	55%	98,7%	91%
Carcinogenics	CTUh	100%	55%	97,8%	91%
Ecotoxicity	CTUe	100%	55%	97,8%	91%
Eutrophication	kg N eq	100%	55%	99,2%	91%
Fossil fuel depletion	MJ surplus	100%	55%	97,8%	91%
Global warming	kg CO2 eq	100%	55%	98,3%	91%
Non carcinogenics	CTUh	100%	55%	97,8%	91%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	100%	55%	98,2%	91%
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	100%	55%	98,8%	91%
Smog	kg O3 eq	100%	55%	97,8%	91%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Dosificación de recapados en Valdivia

DOSIFICACIONES					
	Cemento (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)
S/F	137560	405440	233490	72400	-
C/FV	76000	224000	129000	40000	5495
C/FNFU	134520	396480	228330	70800	13895
C/FPPA	124640	367360	211560	65600	12874

Fuente: Elaboración propia

- Punta Arenas

Figura 33. Impactos ambientales de recapados en Punta Arenas

Impact category	Reference unit	R_SF_PA	R_FV_PA	R_FNFU_PA	R_FPPA_PA
Acidification	kg SO2 eq	368.2060745	190.7803495	362.1104674	330.0500046
Carcinogenics	CTUh	6.21844E-05	3.22199E-05	6.05734E-05	5.57405E-05
Ecotoxicity	CTUe	2492.345152	1291.370545	2427.776625	2234.071043
Eutrophication	kg N eq	13.58027317	7.036410968	13.42249227	12.17299097
Fossil fuel depletion	MJ surplus	44319.76775	22963.61023	43171.58723	39727.0457
Global warming	kg CO2 eq	134146,9842	69506.20942	131315.2767	120245.7423
Non carcinogenics	CTUh	0.003787903	0.001962644	0.00368977	0.003395374
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.00859112	0.004451357	0.008401019	0.007700848
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	20.63828774	10.69341333	20.3140477	18.49960507
Smog	kg O3 eq	4624.248374	2395.983613	4504.449193	4145.051651

Fuente: Elaboración propia

Tabla 42. Impactos ambientales en % en Punta Arenas

Impact category	Reference unit	P_SF_PA	P_FV_PA	P_FR_PA	P_V_PA
Acidification	kg SO2 eq	100%	52%	98,3%	90%
Carcinogenics	CTUh	100%	52%	97,4%	90%
Ecotoxicity	CTUe	100%	52%	97,4%	90%
Eutrophication	kg N eq	100%	52%	98,8%	90%
Fossil fuel depletion	MJ surplus	100%	52%	97,4%	90%
Global warming	kg CO2 eq	100%	52%	97,9%	90%
Non carcinogenics	CTUh	100%	52%	97,4%	90%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	100%	52%	97,8%	90%
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	100%	52%	98,4%	90%
Smog	kg O3 eq	100%	52%	97,4%	90%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 43. Dosificación de recapados en Punta Arenas

DOSIFICACIONES					
	Cemento (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)
S/F	146680	432320	248970	77200	-
C/FV	76000	224000	129000	40000	5495
C/FNFU	142880	421120	242520	75200	14758
C/FPPA	131480	387520	223170	69200	13581

Fuente: Elaboración propia

- Temuco

Tabla 44. Impactos ambientales en recapados en Temuco

Impact category	Reference unit	R_SF_T	R_FV_T	R_FNFU_T	R_FPPA_T
Acidification	kg SO2 eq	349.1280396	190.7803495	344.7755085	314.7875766
Carcinogenics	CTUh	5.89624E-05	3.22199E-05	5.76736E-05	5.31629E-05
Ecotoxicity	CTUe	2363.208098	1291.370545	2311.553276	2130.7614
Eutrophication	kg N eq	12.87663207	7.036410968	12.77993273	11.6100781
Fossil fuel depletion	MJ surplus	42023.40672	22963.61023	41104.86231	37889.95688
Global warming	kg CO2 eq	127196.3632	69506.20942	125028.9289	114685.2455
Non carcinogenics	CTUh	0.003591638	0.001962644	0.003513132	0.003238362
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0.008145984	0.004451357	0.007998844	0.007344739
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	19.5689464	10.69341333	19.34157382	17.644132
Smog	kg O3 eq	4384.650012	2395.983613	4288.810668	3953.372962

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Impactos ambientales en % en Temuco

Impact category	Reference unit	P_SF_T	P_FV_T	P_FR_T	P_V_T
Acidification	kg SO2 eq	100%	55%	98,8%	90%
Carcinogenics	CTUh	100%	55%	97,8%	90%
Ecotoxicity	CTUe	100%	55%	97,8%	90%
Eutrophication	kg N eq	100%	55%	99,2%	90%
Fossil fuel depletion	MJ surplus	100%	55%	97,8%	90%
Global warming	kg CO2 eq	100%	55%	98,3%	90%
Non carcinogenics	CTUh	100%	55%	97,8%	90%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	100%	55%	98,2%	90%
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	100%	55%	98,8%	90%
Smog	kg O3 eq	100%	55%	97,8%	90%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46. Dosificación en Temuco

DOSIFICACIONES					
	Cemento (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)
S/F	139080	409920	236070	73200	-
C/FV	76000	224000	129000	40000	5495
C/FNFU	136040	400960	230910	71600	14052
C/FPPA	125400	369600	212850	66000	12953

Fuente: Elaboración propia