



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**ANÁLISIS TÉCNICO AMBIENTAL DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON  
LIGNINA KRAFT**

POR

**Domingo Antonio Ortiz Arias**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para  
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía  
Daniella Escribano Leiva

Profesional Supervisor  
Alex Schwarz Kusch

Marzo 2024  
Concepción (Chile)

© 2024 Domingo Ortiz Arias

© 2024 Domingo Ortiz Arias

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

## RESUMEN

Existe un crecimiento proyectado en la demanda mundial de asfalto, principalmente impulsado por la necesidad de construir y mantener carreteras. Sin embargo, se ve afectado por la reducción de ligante asfáltico debido al desarrollo de nuevas tecnologías en la refinación de crudo de petróleo. Así mismo, las carreteras pavimentadas con asfalto contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos. Para hacer frente a estos problemas ambientales, se investiga el uso de materiales renovables como la lignina, un subproducto de la industria papelera, como sustituto parcial del betún.

El objetivo de esta investigación fue analizar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada con lignina, así como evaluar su potencial reducción del impacto ambiental. Esto como potencial alternativa competitiva a la mezcla tradicional en pavimentación. Para ello, se diseñó experimentalmente un ligante modificado utilizando diferentes porcentajes de lignina. Posteriormente, se elaboró el diseño de mezcla asfáltica modificada y se evaluó el pavimento desde una perspectiva estructural, para finalmente comparar esta alternativa de pavimentación modificada con la pavimentación tradicional. Esta comparación se llevó a cabo desde un enfoque de impacto ambiental. Se utilizó el análisis de ciclo de vida para evaluar el impacto ambiental de cada una de las alternativas de pavimentación.

Los resultados obtenidos revelaron que el ligante modificado con diferentes porcentajes de lignina experimentó un aumento en su viscosidad cinemática y una disminución en la ductilidad. Sin embargo, en ninguno de los casos se logró alcanzar el mínimo especificado, por lo cual se sugiere un porcentaje de reemplazo del 0,5% de lignina. Por otro lado, la mezcla asfáltica diseñada con el ligante modificado demostró una mayor estabilidad y densidad en comparación con una mezcla tradicional. Este hallazgo implica que la mezcla modificada requiere un espesor menor para proporcionar una capacidad de soporte equivalente, lo que conlleva a un menor consumo de materiales y volúmenes de transporte.

En lo que respecta al análisis de impacto ambiental, se observó una reducción en el impacto ambiental en la mayoría de las categorías evaluadas. Destaca especialmente una disminución del 0,8% en las emisiones de gases de efecto invernadero y un 5% en promedio en las categorías de impacto ambiental.

## **ABSTRACT**

There is a projected growth in global demand for asphalt, primarily driven by the need to build and maintain roads. However, it is affected by the reduction of asphalt binder due to the development of new technologies in petroleum crude oil refining. Additionally, asphalt-paved roads contribute to greenhouse gas emissions and atmospheric pollutants. To address these environmental problems, research is being conducted into the use of renewable materials such as lignin, a byproduct of the paper industry, as a partial substitute for bitumen.

The objective of this research was to analyze the mechanical behavior of asphalt mixture modified with lignin, as well as to evaluate its potential for reducing environmental impact. This serves as a potential competitive alternative to traditional asphalt mixture in paving. To achieve this, a modified binder was experimentally designed using different percentages of lignin. Subsequently, the design of the modified asphalt mixture was developed, and the pavement was evaluated from a structural perspective. Finally, this modified paving alternative was compared with traditional paving from an environmental impact standpoint. Life cycle analysis was used to assess the environmental impact of each paving alternative.

The results revealed that the binder modified with different percentages of lignin experienced an increase in its kinematic viscosity and a decrease in ductility. However, in none of the cases was the specified minimum achieved, thus suggesting a 0.5% lignin replacement percentage. On the other hand, the asphalt mixture designed with the modified binder demonstrated higher stability and density compared to a traditional mixture. This finding implies that the modified mixture requires a lesser thickness to provide equivalent support capacity, resulting in reduced material consumption and transportation volumes.

Regarding the environmental impact analysis, a reduction in environmental impact was observed in most of the evaluated categories. Particularly noteworthy is a 0.8% decrease in greenhouse gas emissions and an average 5% reduction in environmental impact categories.

## DEDICATORIA

*Este trabajo está dedicado a mis padres, Anita y Domingo, así como a mi hermana Alejandra, quienes siempre me brindaron su apoyo y confiaron en mí. Su presencia constante y apoyo incondicional fueron un pilar fundamental en los momentos en que los necesitaba.*

*A mis amigos, quienes fueron compañeros valiosos a lo largo de mi trayectoria universitaria, desempeñando un papel esencial durante este tiempo, compartiendo experiencias, risas y momentos inolvidables.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quisiera agradecer a la empresa Clasa SA por su constante apoyo y consejos para hacer posible el desarrollo de esta investigación. Además, agradezco por facilitar sus instalaciones para poder realizar los ensayos necesarios para el estudio.

Quisiera agradecer también a la Srta. María Elena Araneda, jefa de asistencia técnica en Clasa SA por darme la oportunidad de realizar esta investigación e invertir parte de su tiempo para guiarme a través de este estudio.

Finalmente, agradecer al profesor Dr. Mauricio Pradena, por su disposición constante y por incentivarme a seguir mejorando. También agradezco a la Dra. Daniella Escribano por ser mi profesora guía en esta memoria de título y contribuir al desarrollo de esta. Asimismo, agradezco al Dr. Alex Schwarz por formar parte de la comisión.

**Índice de contenido**

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    Motivación .....	1
1.2    Objetivo general.....	2
1.3    Objetivos específicos .....	2
1.4    Metodología de trabajo .....	2
1.5    Principales resultados y conclusiones.....	3
1.6    Organización de documento .....	3
CAPITULO 2 LIGNINA COMO ALTERNATIVA DE MODIFICADOR DEL BETUMEN.....	5
2.1    Introducción .....	5
2.2    Asfaltos modificados .....	5
2.2.1    Definición del biopolímero lignina.....	5
2.2.2    Lignina como modificador del asfalto .....	6
2.2.3    Mezclas de asfalto en caliente con ligante modificado.....	8
2.3    Clasificación de asfaltos en Chile y sus requerimientos.....	10
2.4    Análisis del ciclo de vida .....	10
2.4.1    Herramientas para el análisis del ciclo de vida.....	13
2.5    Conclusiones.....	14
CAPITULO 3 MATERIALES Y METODOS.....	15
3.1    Introducción .....	15
3.2    Diseño de ligante modificado .....	16
3.2.1    Ensayos preliminares con pitch .....	18
3.3    Diseño de mezcla de asfalto en caliente .....	19
3.3.1    Caracterización de áridos .....	19
3.3.2    Diseño Marshall .....	21

3.3.3	TSR Susceptibilidad a la humedad .....	22
3.4	Diseño Estructural.....	23
3.4.1	Método AASHTO MOP .....	23
3.4.2	Supuestos de diseño .....	24
3.5	Análisis del ciclo de vida .....	24
3.5.1	Objetivo y alcance del estudio .....	25
3.5.2	Análisis del inventario .....	28
3.5.3	Análisis del impacto del ciclo de vida .....	28
3.5.4	Interpretación .....	30
3.6	Conclusión .....	30
CAPITULO 4 RESULTADOS .....		31
4.1	Introducción .....	31
4.2	Resultados del diseño de ligante modificado.....	31
4.2.1	Resultados ensayos generales .....	31
4.2.2	Resultados ensayos específicos.....	34
4.3	Resultados del diseño de mezcla de asfalto en caliente (MAC) .....	37
4.3.1	Características de los áridos.....	37
4.3.2	Diseño Marshall .....	37
4.3.3	Ensayo TSR .....	42
4.4	Resultados del diseño estructural.....	43
4.4.1	Método AASHTO-MOP .....	43
4.5	Resultados análisis del impacto ambiental (ACV) .....	43
4.5.1	Análisis de sensibilidad.....	45
4.6	Conclusión .....	46
CAPITULO 5 CONCLUSIONES.....		48
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>50</b>



---

<b>ANEXOS</b> .....	52
Anexo 4.1 Informe de laboratorio de Pitch Asfáltico .....	52
Anexo 4.2 Informe de laboratorio de Cemento Asfáltico (CA-24).....	54
Anexo 4.3 Informe MAC tradicional .....	56
Anexo 4.4 Informe TSR de MAC tradicional .....	59
Anexo 4.5 Informe MAC modificada con 0,5% de lignina .....	60

**Índice de tablas**

Tabla 2-1 Especificaciones para los cementos asfálticos según grado de viscosidad Fuente: (MOP, 2022b).....	10
Tabla 2-2 Fases de un ACV según ISO 14.040 Fuente: adaptado de (Ihobe, 2009).....	12
Tabla 2-3 Programas que realizan el análisis de impacto del ciclo de vida Fuente: (Araneda, 2021)	13
Tabla 3-1 Ensayos a realizar para describir las propiedades del cemento asfáltico.....	17
Tabla 3-2 Ensayos para describir las propiedades de los áridos .....	19
Tabla 3-3 Mezcla de áridos .....	20
Tabla 3-4 Ensayos para describir constantes físicas e hídricas de la mezcla de áridos .....	20
Tabla 3-5 Actividades realizadas del método Marshall .....	21
Tabla 3-6 Actividades realizadas para determinar el daño por humedad.....	22
Tabla 3-7 Objetivo y alcance de los sistemas en estudio .....	26
Tabla 4-1 Propiedades del ligante pitch asfáltico modificado .....	31
Tabla 4-2 Propiedades del ligante CA-24 modificado .....	34
Tabla 4-3 Resultados de las propiedades de la mezcla de áridos.....	37
Tabla 4-4 Resultados del ensayo TSR con ligante tradicional CA-24.....	42
Tabla 4-5 Resultados del ensayo TSR con ligante modificado CA-24 + 0,5% lignina .....	42
Tabla 4-6 Resultados del método AASHTO-MOP.....	43
Tabla 4-7 Resultados de los indicadores de impacto ambiental y salud humana para 1m <sup>2</sup> de asfalto	44
Tabla 4-8 Resultados de los indicadores de impacto ambiental y salud humana para 1m <sup>2</sup> de asfalto con una planta asfáltica a 20 kilómetros .....	45

**Índice de figuras**

Figura 2-1 Lignina kraft, Fuente: (Ashby, 2018).....	6
Figura 2-2 Resultados de los ensayos realizados por (Zahedi et al., 2020) .....	7
Figura 2-3 a) Punto de ablandamiento b) Viscosidad rotacional. Fuente:(Yu et al., 2021).....	8
Figura 2-4 Resultados de estabilidad Marshall. Fuente: (Zahedi et al., 2020).....	9
Figura 2-5 Etapas de ciclo de vida de un producto. Fuente: (Ashby, 2018) .....	11
Figura 2-6 Modelos de análisis de ciclo de vida. Fuente: (Ihobe, 2009) .....	12
Figura 3-1 Diagrama de flujo de las etapas de la metodología. Fuente: Elaboración propia.....	15
Figura 3-2 Mezclador rotacional. Fuente: Elaboración propia .....	17
Figura 3-3 Diagrama de las fases de análisis del ciclo de vida según ISO 14040 (2006).....	24
Figura 3-4 Etapas del ciclo de vida consideradas en el estudio Fuente: adaptado de (Ashby, 2018)	25
Figura 3-5 Diagrama de los procesos considerados en el ACV para pavimento tradicional .....	27
Figura 3-6 Diagrama de los procesos considerados en el ACV para pavimento modificado.....	27
Figura 4-1 Resultados ensayo de penetración .....	32
Figura 4-2 Resultados ensayo de viscosidad.....	33
Figura 4-3 Resultados de los ensayos de ductilidad.....	34
Figura 4-4 Resultados del ensayo de penetración .....	35
Figura 4-5 Resultados de los ensayos de viscosidad.....	36
Figura 4-6 Resultados de los ensayos de ductilidad.....	36
Figura 4-7 Resultado de densidad utilizando el método Marshall con el ligante tradicional .....	38
Figura 4-8 Resultados de estabilidad utilizando el método Marshall con el ligante tradicional.....	38
Figura 4-9 Resultados de vacíos de aire utilizando el método Marshall con el ligante tradicional ...	39
Figura 4-10 Resultado de densidad utilizando el método Marshall con el ligante modificado .....	40
Figura 4-11 Resultados de estabilidad utilizando el método Marshall con el ligante modificado.....	40
Figura 4-12 Resultados de vacíos de aire utilizando el método Marshall con el ligante modificado	41
Figura 4-13 Resultados del impacto ambiental normalizados .....	44
Figura 4-14 Resultados del impacto ambiental normalizados con una planta asfáltica a 20 kilómetros .....	46

## CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación

En la actualidad se pronostica que la demanda mundial de asfalto aumentará para su aplicación en las carreteras. El crecimiento intensivo del consumo de asfalto se debe en gran medida a la construcción de pavimentos asfálticos, así como a su mantenimiento y reparación. El ligante de asfalto utilizado en el pavimento es un subproducto del proceso de refinación del crudo de petróleo, denominado betumen. El reciente desarrollo de nuevas tecnologías en la refinería ha degradado la cantidad de betumen y, por lo tanto, ha resultado en un aumento del precio del material (Zhu et al., 2014).

Las carreteras pavimentadas con asfalto son responsables de diversos impactos ambientales, como el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de contaminantes atmosféricos como el CO<sub>2</sub>, el NO<sub>2</sub> y material particulado fino (Meijer et al., 2018). En el mundo se utilizan más de 86 millones de toneladas de asfalto al año, el cual es mezclado con áridos para la construcción de caminos. La producción de esta mezcla asfáltica genera cerca de 262,6 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada (Bradley, 2021).

Para disminuir el impacto ambiental del asfalto se han realizado múltiples investigaciones para reemplazar el asfalto con materiales renovables (Zahedi et al., 2020). Los recursos de origen biológico son favorecidos desde el punto de vista de la sostenibilidad: son renovables y no contribuyen al cambio climático, ya que los gases de efecto invernadero se capturan de la atmósfera como resultado de la fotosíntesis en la fuente vegetal original (Su et al., 2018).

En este contexto, el uso de lignina como sustituto parcial del betumen resulta en una solución atractiva y respetuosa con el medio ambiente (Gaudenzi et al., 2023). La lignina es un subproducto de la industria papelera, siendo una práctica común su quema como fuente de energía para abastecer a la planta (Bradley, 2021). Además, la lignina es el segundo biopolímero más abundante y extendido en la Tierra después de la celulosa (Gaudenzi et al., 2023).

Este estudio propone analizar el comportamiento mecánico del cemento asfáltico modificado con lignina y su contribución al medio ambiente. A través de una evaluación en laboratorio y un análisis

del ciclo de vida, se busca no solo comprender las propiedades del ligante modificado, sino también cuantificar su impacto ambiental en comparación con el asfalto convencional. Los resultados de esta investigación pueden proporcionar información para la toma de decisiones en la industria de la construcción, impulsando la adopción de prácticas más sostenibles y respetuosas con el entorno.

## **1.2 Objetivo general**

Analizar el comportamiento mecánico del cemento asfáltico en caliente adicionado con el biopolímero lignina y su reducción del impacto ambiental.

## **1.3 Objetivos específicos**

1. Evaluar en laboratorio las propiedades del ligante asfáltico modificado con lignina.
2. Evaluar experimentalmente propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con lignina.
3. Comparar analíticamente el impacto ambiental de la mezcla asfáltica modificada con lignina versus una mezcla asfáltica tradicional.

## **1.4 Metodología de trabajo**

El estudio se desarrolló en cuatro etapas distintas. La primera etapa se inició con el diseño de un ligante modificado, empleando dos tipos de ligantes y variando los porcentajes de reemplazo de lignina kraft. Posteriormente, se llevaron a cabo ensayos para determinar el ligante más idóneo a utilizar en las siguientes etapas del proceso. El siguiente paso consistió en el diseño de una mezcla asfáltica en caliente mediante el método Marshall. Se confeccionaron probetas con diversos porcentajes para luego someterlas a ensayos que permitieran identificar la composición más eficiente. En la tercera etapa, se llevó a cabo el diseño estructural del pavimento utilizando el método AASHTO-MOP, considerando dos alternativas de pavimentación. Finalmente, se realizó un análisis de impacto ambiental, comparando la construcción de pavimentos asfálticos en caliente con ligante modificado

frente a la construcción de pavimentos asfálticos en caliente con ligante tradicional. Este análisis se basó en la evaluación del ciclo de vida de ambos tipos de pavimentación.

### **1.5 Principales resultados y conclusiones**

Se destaca que para ambos ligantes modificados con lignina se observó un aumento en la viscosidad cinemática tanto en estado sin envejecer como envejecido, en donde para el ligante CA-24 aumento un 30%. Sin embargo, la ductilidad disminuyó en ambas condiciones, alrededor de un 53%, dando como resultado un ligante más rígido y quebradizo. Al comparar los diferentes porcentajes de reemplazo de lignina, se concluyó que un porcentaje del 0,5% es aquel con el cual los resultados se aproximan mejor a las especificaciones requeridas.

En cuanto al diseño de mezclas asfálticas, se evidenció que la mezcla con ligante modificado presenta una mayor estabilidad Marshall y densidad. No obstante, esto implica un aumento del 0,7% de ligante necesario en la mezcla. Al realizar el diseño estructural con estos resultados, se determinó que para lograr que ambas alternativas de pavimentación proporcionen una capacidad estructural equivalente, la mezcla con ligante modificado requiere un espesor de 50 mm, mientras que la mezcla tradicional demanda un espesor de 53 mm. Esta diferencia sugiere que la mezcla modificada, al requerir un menor espesor, requiere un menor uso de materiales y volúmenes de transporte.

Finalmente, en relación con el análisis de impacto ambiental, los resultados indican una reducción en la mayoría de las categorías de impacto. Para la categoría de calentamiento global, se logró una disminución del 0,8%. Estos resultados permiten concluir que la implementación de la mezcla con ligante modificado no solo mejora las propiedades mecánicas, sino que también conlleva beneficios ambientales.

### **1.6 Organización de documento**

Este documento se estructura en cinco capítulos. En el primero, se realiza la introducción. El segundo capítulo se centra en la revisión bibliográfica, abarcando el estado actual del conocimiento sobre la lignina como modificador del ligante asfáltico, mezclas asfálticas modificadas y el análisis de impacto ambiental. En el tercer capítulo, se detalla la metodología de trabajo, que incluye el diseño de ligante

modificado, el diseño de mezcla asfáltica en caliente (MAC) utilizando el método Marshall, el diseño estructural de pavimento utilizando el método AASHTO-MOP y, finalmente, la metodología para realizar el análisis del ciclo de vida utilizando el software OpenLCA 2.0. El cuarto capítulo presenta los resultados del diseño de ligante modificado, los resultados del diseño de mezcla asfáltica, seguido por el diseño estructural de dos alternativas de pavimentación, una tradicional y otra modificada, además de los resultados del impacto ambiental de ambas alternativas. Finalmente, en el quinto capítulo se exponen las principales conclusiones del trabajo y las futuras líneas de investigación.

## **CAPITULO 2      LIGNINA   COMO   ALTERNATIVA   DE   MODIFICADOR   DEL BETUMEN**

### **2.1 Introducción**

En la actualidad existe un crecimiento de la demanda de asfalto, el cual se debe al crecimiento y mejoras constante de las vías. Por otro lado, las refinerías han incrementado su tecnología, permitiéndoles obtener productos de mayor valor a partir del crudo de petróleo, lo que ha resultado en una reducción tanto en la cantidad como en la calidad del betún producido.

En este capítulo se abordan las diversas investigaciones respecto a la utilización de lignina como un polímero modificador del betumen, con el objetivo de mejorar sus propiedades y disminuir el impacto ambiental de éste. Se presentan los diversos porcentajes de reemplazo estudiados y sus resultados.

### **2.2 Asfaltos modificados**

#### **2.2.1 Definición del biopolímero lignina**

La lignina es un polímero aromático complejo que se encuentra principalmente en las paredes celulares secundarias de la madera. A diferencia de la celulosa, la estructura de la lignina no es uniforme y carece de un patrón polimérico repetitivo. La estructura de la lignina varía notablemente entre especies de madera, e incluso entre partes de árboles individuales, por lo que existe una baja probabilidad de que dos macromoléculas de lignina sean idénticas. Además, la lignina es altamente reactiva y está fuertemente unida a la celulosa y a las hemicelulosas en la pared celular. Por lo tanto, su estructura a menudo se altera durante el aislamiento, lo que complica los esfuerzos para definir su formulación nativa en detalle (Mikkonen, 2020).

La lignina contiene núcleos aromáticos unidos por cadenas de alquilo como las fracciones aromáticas y asfálticas del betún, y las características de la lignina le otorgan la capacidad de actuar como emulsionante o dispersante, lo que la hace potencialmente adecuada para su uso en la formulación de betún (Bradley, 2021).





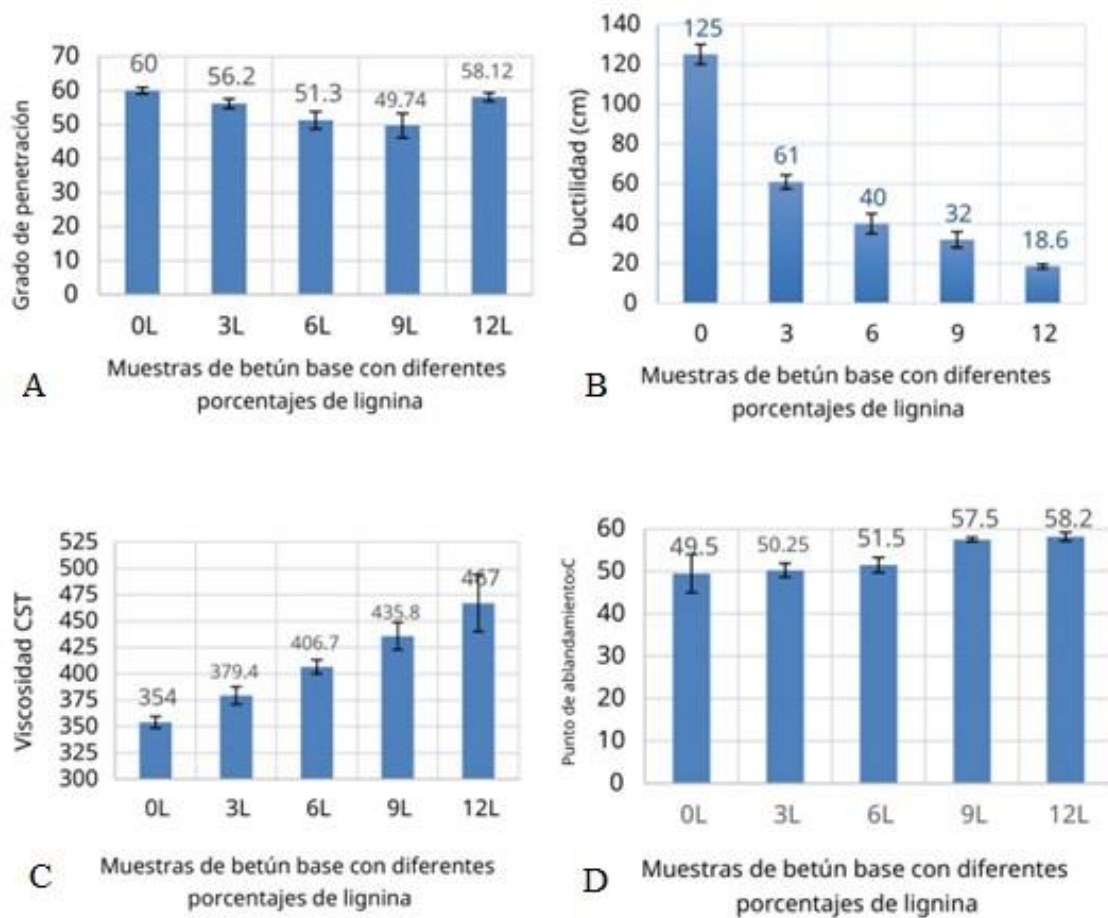
**Figura 2-1** Lignina kraft, Fuente: (Ashby, 2018)

Existen diferentes procesos químicos para la conversión química de la lignina, lo que da como resultado diferentes tipos de esta. La lignina kraft se deriva del proceso kraft, que es el proceso global dominante con aproximadamente el 85 % de la producción total de lignina en el mundo (Gaudenzi et al., 2023).

### **2.2.2 Lignina como modificador del asfalto**

Xu et al., (2017) añadieron polvo de lignina a dos ligantes asfálticos, ambos medidos por su grado de desempeño y modificados con butadieno estireno (SBS): PG 64/22 y PG 76/22. La lignina se usó como modificador del asfalto y sustituto parcial en un 5% y 10% en peso. Se mezcló a una temperatura de 163°C mediante un mezclador de cizallamiento regular a una velocidad de 1500 rpm por un tiempo de 30 minutos. Se realizaron pruebas reológicas, agrietamiento por fatiga, formación de surcos y otras. Los resultados muestran que la viscosidad del ligante asfáltico modificado con lignina es más alta que la del ligante base, y además que la lignina mejora significativamente la resistencia a la formación de surcos del ligante asfáltico a altas temperaturas. Sin embargo, la lignina puede tener un impacto negativo en la resistencia a la fatiga del ligante asfáltico. La prueba espectral reveló que la lignina puede prevenir la formación de grupos funcionales carbonilo en el proceso de envejecimiento del ligante asfáltico. Con esto, el estudio de Xu et al., (2017) concluyó que la lignina se puede utilizar como modificador antioxidante y tiene beneficios ambientales y económicos.

Zahedi et al., (2020) evaluaron un asfalto con grado de penetración de 60/70 al que le fue adicionada lignina en cuatro porcentajes diferentes: 3%, 6%, 9% y 12% con respecto al peso del asfalto. La lignina fue extraída de aguas residuales de la fabricación de papel. Para la preparación de la mezcla se usó una mezcladora de alto cizallamiento durante 30 minutos con una velocidad de 5000 rpm y una temperatura constante de 155°C. Se realizaron pruebas para el grado de penetración, punto de ablandamiento, ductilidad del betún, viscosidad, sensibilidad térmica entre otros. Los resultados mostraron que, a mayor cantidad de lignina disminuye el grado de penetración (Figura 2-2A), así como también la ductilidad (Figura 2-2B). Por otro lado, se produjo un aumento en la viscosidad cinemática (Figura 2-2C) y en el punto de ablandamiento (Figura 2-2D). Los autores concluyeron que al aumentar la cantidad de lignina disminuye la sensibilidad a los cambios de temperatura y se reduce la oxidación del asfalto a altas temperaturas.



**Figura 2-2** Resultados de los ensayos realizados por (Zahedi et al., 2020)

Similarmente Yu et al., (2021), desarrollaron un asfalto modificado mediante la adición de polvo de lignina de soda en reemplazos de 5%, 10%, 15% y 20% sobre un asfalto de penetración 60/70. Se mezcló a una temperatura de 155°C por 50 minutos a 8000 rpm con una máquina de alto cizallamiento. Se realizaron diferentes pruebas relacionadas a las propiedades generales: trabajabilidad, rendimiento de laboratorio, estabilidad de almacenamiento y de caracterización química. Los resultados muestran que la incorporación de polvo de lignina disminuyó la sensibilidad a la temperatura, ya que, a mayor porcentaje de reemplazo, la temperatura de ablandamiento del asfalto es mayor (Figura 2-3a) y aumentó la viscosidad, de manera creciente para cada porcentaje de reemplazo (Figura 2-3b) dejándolo más duro, quebradizo y menos dúctil (pérdida de flexibilidad y tenacidad). Por otro lado, los resultados de las pruebas reológicas mostraron que la adición de lignina mejoró significativamente la resistencia a la formación de surcos y las propiedades de fatiga. Además, concluyeron que la lignina de soda se puede mezclar físicamente sin la necesidad de grupos funcionales según el espectro infrarrojo obtenido por transformada de Fourier. Finalmente, en base a las pruebas realizadas, Yu et al., (2021) recomiendan una dosis óptima de reemplazo del 15% en peso.

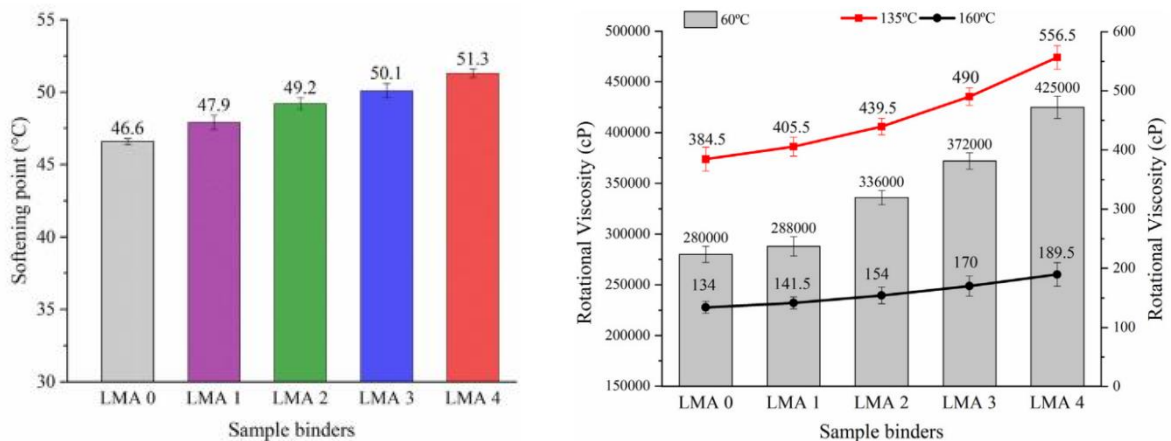
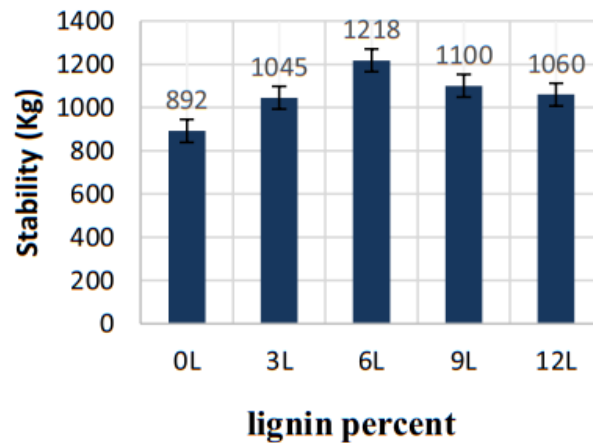


Figura 2-3 a) Punto de ablandamiento b) Viscosidad rotacional. Fuente:(Yu et al., 2021)

### 2.2.3 Mezclas de asfalto en caliente con ligante modificado

En la actualidad existe un número limitado de estudios que han realizado mezclas de asfalto en caliente con ligante modificado con lignina. Zahedi et al., (2020) evaluaron un asfalto con grado de penetración de 60/70, realizaron pruebas de flujo Marshall, peso específico, estabilidad Marshall, vacíos en el agregado mineral, vacíos en mezcla total y vacíos rellenos con asfalto. Los resultados se muestran en

la Figura 2-4, donde se muestra que la estabilidad aumenta con un 3 y 6 % de reemplazo de lignina en el betumen. Finalmente, el estudio mostró que un porcentaje de 6% con respecto al peso del asfalto de lignina ayuda a mejorar la estabilidad Marshall y corresponde al porcentaje óptimo.



**Figura 2-4** Resultados de estabilidad Marshall. Fuente: (Zahedi et al., 2020)

Otro estudio desarrollado por Zhang et al., 2020 investigó los efectos de la lignina sobre las propiedades mecánicas de un asfalto con grado de penetración 70, al cual se le adicionó polvo de lignina extraído por método organosolv. Para preparar la muestra se utilizó 10% de lignina con respecto al peso del asfalto y se mezcló durante 30 minutos a una velocidad de 3000 rpm, y a una temperatura de 163°C con un mezclador de alto cizallamiento. El estudio consistió en una mezcla asfáltica con el ligante y pruebas para evaluar resistencia a la abrasión, formación de baches, agrietamiento, congelación-descongelación. Como resultado, se obtuvo que el polvo de lignina mejoró la capacidad de resistencia a la abrasión y disminuyó la profundidad de formación de surcos. Respecto a la resistencia al agrietamiento térmico, se determinó que la lignina mejora la resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas, y para la susceptibilidad a la humedad se mostró que la lignina tiene un efecto reforzante que mejora la adhesión entre los aglomerantes y los agregados de asfalto, teniendo mejor estabilidad a la humedad.

### 2.3 Clasificación de asfaltos en Chile y sus requerimientos

Los asfaltos o cementos asfálticos en Chile se especifican según la tabla 8.301.1.A del Manual de Carreteras Volumen 8. Estos requerimientos se muestran en la Tabla 2-1.

**Tabla 2-1** Especificaciones para los cementos asfálticos según grado de viscosidad Fuente: (MOP, 2022b)

Ensayo	GRADO DE VISCOSIDAD	
	CA 24	CA 14
Viscosidad a 60°C, (Poise)	Mín. 2400	Mín. 1400
Penetración a 25°C, 100g, 5s, (0,1mm)	Mín. 40	Mín. 40
Ductilidad a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	Mín. 100
Mancha: Heptano-Xilol, (% Xilol)	Máx. 30	Máx. 30
Solubilidad en tricloroetileno, (%)	Mín. 99	Mín. 99
Punto de Inflamación, (°C)	Mín. 232	Mín. 232
Punto de Ablandamiento, (°C)	Informar	Informar
índice de Penetración, (IP)	-2,0 a +1,0	-2,0 a +1,0
<b>Película Delgada Rotatoria</b>		
Pérdida por calentamiento, (%)	Máx. 0,8	Máx. 0,8
Viscosidad a 60°C, 300 mm Hg, (Poise)	Informar	Informar
Ductilidad residuo, a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	Mín. 100
índice de Durabilidad	Máx. 4	Máx. 4

Como se indica en la Tabla 2-1, los cementos asfálticos se miden por grado de viscosidad en poises, equivalente a  $1 \text{ gr} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm})^{-1}$ , una medida poco común en el estado del arte actual. Además, el manual no describe a los asfaltos por grado de penetración en los proyectos chilenos (MOP, 2022b).

### 2.4 Análisis del ciclo de vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica que sirve para medir el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida (desde que se obtienen las materias primas hasta el fin de su vida útil). Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener resultados que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de estos (Ihobe, 2009).

El ciclo de vida de un producto considera desde su origen como materia prima hasta su final como residuo, teniendo en cuenta todas las fases intermedias como transporte, preparación de materias primas, manufactura, transporte a mercados, distribución, uso, etc. El análisis de ciclo de vida consiste por tanto en un tipo de contabilidad ambiental en la que se cargan a los productos los efectos ambientales adversos, debidamente cuantificados, generados a lo largo de su ciclo de vida (Ashby, 2013).

Esta herramienta tiene un enfoque holístico, es decir, que se basa en la idea de que todas las propiedades de un sistema no pueden ser determinadas o explicadas solo de manera individual por las partes que lo componen. Es necesaria la integración total de todos los aspectos que participan; de ahí el concepto de tener en cuenta todo el ciclo de vida del sistema (Ihobe, 2009).

El ciclo de vida de un producto consta de cinco etapas principales: extracción de materia prima, fabricación del producto, transporte, uso del producto y disposición de residuos. En la Figura 2-5 se muestran las etapas del ciclo de vida de un producto y sus relaciones.

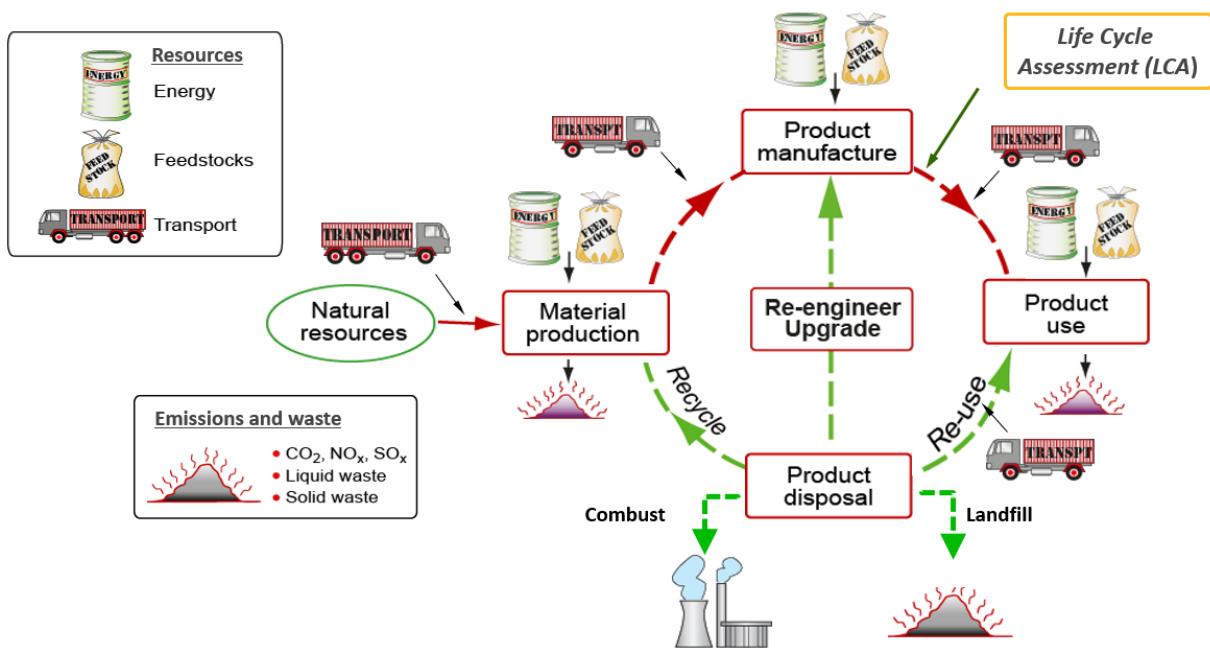


Figura 2-5 Etapas de ciclo de vida de un producto. Fuente: (Ashby, 2018)

Existen distintos modelos de ACV de un producto, los cuales abarcan distintas etapas del ciclo vida. En la Figura 2-6 se muestran los diferentes modelos de análisis de ciclo de vida. El modelo “de la cuna a la tumba” abarca las cinco etapas del ciclo de vida. El modelo “de la cuna a la puerta” abarca las tres primeras etapas, analizando el producto hasta que sale de las puertas de la fábrica, dejando de lado el uso y la disposición final. El modelo “de la cuna a la cuna” es una variación del primer modelo nombrado, en donde los residuos entran en proceso de reciclaje y son reconvertidos en otro producto, está asociado a la economía circular (Vogtländer, 2023).



**Figura 2-6** Modelos de análisis de ciclo de vida. Fuente: (Ihobe, 2009)

La aplicación del análisis de ciclo de vida esta normalizado según la ISO 14.040 (2006), en donde se establece un marco para la estandarización de la metodología de ACV. Esta norma distingue cuatro fases en un estudio de ACV, estas se muestran en la Tabla 2-2.

**Tabla 2-2** Fases de un ACV según ISO 14.040 Fuente: adaptado de (Ihobe, 2009)

Fase	Descripción
Definición de objetivos y alcance	Define el objetivo y el uso previsto del estudio, así como el alcance, la unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida, la calidad exigida en los datos y los parámetros tecnológicos y de evaluación.
Inventario de ciclo de vida (ICV)	Es la fase del ACV en la que se recogen los datos correspondientes a las entradas y salidas para todos los procesos del sistema de producto.

Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV)	Es la fase del ACV en la que el inventario de entradas y salidas es trasladado a indicadores de potenciales impactos ambientales al medio ambiente, a la salud humana y a la disponibilidad de recursos naturales.
Interpretación	Es la fase del ACV en la que los resultados del ICV y el EICV son interpretados de acuerdo con el objetivo y alcance marcados inicialmente. En esta fase se realiza un análisis de los resultados y se marcan las conclusiones.

### 2.4.1 Herramientas para el análisis del ciclo de vida

En los últimos años, se han desarrollado numerosos programas que facilitan el cálculo del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Estos programas incorporan bases de datos de inventarios públicos, variando en extensión y calidad, factores que influyen directamente en su costo. Se introducen datos en estos programas que configuran el inventario para luego realizar los cálculos específicos del ACV, obteniendo resultados para diversas categorías de impacto. Algunos programas también incluyen análisis de sensibilidad e incertidumbre para una evaluación más completa (Antón Vallejo, 2004).

En la Tabla 2-3 se muestra un resumen de la disponibilidad y variedad de programas utilizados para realizar el análisis del impacto del ciclo de vida.

**Tabla 2-3** Programas que realizan el análisis de impacto del ciclo de vida Fuente: (Araneda, 2021)

Programa	Descripción	Compañía	País
SimaPro	Análisis del ciclo de vida	Pré-consultants	Países Bajos
Eco-it	Análisis del ciclo de vida y huella de carbono	Pré-consultants	Países Bajos
Air	Análisis del ciclo de vida, huella de carbono, huella de agua y análisis económico	Solid Forest	España
OpenLCA	Análisis del ciclo de vida, huella de carbono, huella de agua. Amplio y adaptable	GreenDelta	Alemania
GaBi	Análisis del ciclo de vida	Stuttgart University	Alemania
TEAM	Análisis del ciclo de vida	Ecobilan	Francia
Umberto	Análisis del ciclo de vida y análisis económico	Ifeu-Institut	Alemania



## 2.5 Conclusiones

Las investigaciones actuales muestran que la lignina tiene un gran potencial para modificar el asfalto o para servir de reemplazo parcial del mismo. Sin embargo, las conclusiones en algunos estudios no son concluyentes y los resultados de porcentaje óptimo de reemplazo pueden variar según el tipo de lignina y de asfalto bajo evaluación. Además, las distintas investigaciones encontradas se han centrado en su caracterización técnica, lo que demuestra la necesidad de evaluar desde un punto de vista ambiental, permitiendo establecer si estas son realmente sustentables. Cabe mencionar que el beneficio ambiental depende del lugar del estudio, por lo cual es necesario analizar su ciclo de vida, conociendo la ubicación y todos los procesos involucrados.

**CAPITULO 3 MATERIALES Y METODOS**

**3.1 Introducción**

En este capítulo se plantea la metodología que rigió la investigación, la cual fue aplicada en cada una de las etapas. Estas son: el diseño de ligante modificado, diseño de mezcla asfáltica en caliente (MAC), diseño estructural de pavimento y finalmente, la metodología para realizar el análisis del ciclo de vida de este producto. En la Figura 3-1 se muestra un diagrama de flujo con las etapas de la metodología propuesta. En color azul se muestran las cuatro etapas principales.



**Figura 3-1** Diagrama de flujo de las etapas de la metodología. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, se presentan los diferentes materiales a utilizar. Se definen en detalle los ensayos realizados, tanto generales como específicos. Se describen los casos considerados en cada etapa, sus dosificaciones, la confección de probetas, el proceso de ensayo y las conclusiones obtenidas.

### **3.2 Diseño de ligante modificado**

Los materiales utilizados en esta etapa fueron ligante asfáltico y lignina kraft. Se utilizaron dos tipos de ligantes, pitch y cemento asfáltico (CA-24) que fueron proporcionados por Clasa S.A. provenientes de la refinería ENAP de la comuna de Hualpén, los certificados de calidad se encuentran en el Anexo 4.1 y Anexo 4.2 respectivamente. La lignina utilizada en esta investigación es del tipo kraft, proveniente de pinus sylvestris, extraída en Finlandia y proporcionada por Bioforest Arauco, esta es una lignina similar a la que se puede obtener de la celulosa ubicada en la región del Biobío, Planta Arauco.

Algunos aspectos comunes son los siguientes:

- Velocidad de mezclado: la velocidad para mezclar fue el rango de 700 rpm a 800 rpm, ya que una velocidad mayor a esta la mezcla salpica.
- Temperatura: la temperatura de mezclado escogida fue el rango de 140°C a 150°C, ya que esta es la temperatura de mezclado del ligante original, para mantener esta temperatura se utilizó un manto calefactor que proporcionaba temperatura constante.
- Tiempo de mezclado: el tiempo de mezclado se definió como óptimo 4 horas. Para determinar esto se realizaron pruebas cada 1 hora, en donde en las primeras horas se apreció de forma visual una falta de incorporación y disolución de la lignina con el ligante.
- Mezclador: El mezclador utilizado es de tipo rotacional, con una varilla mezcladora. El mezclador se muestra en la Figura 3-2.



**Figura 3-2** Mezclador rotacional. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3-1 se detallan los diferentes ensayos y análisis realizados en el ligante modificado, así como los métodos empleados en cada caso.

**Tabla 3-1** Ensayos a realizar para describir las propiedades del cemento asfáltico

<b>Ensayos</b>	<b>Método</b>
Penetración a 25°C, 100g, 5s, (0,1mm)	MC 8.302.3
Viscosidad Original a 60°C (Poise)	MC 8.302.24
Ductilidad a 25°C, 5cm/min (cm)	MC 8.302.8
Ensayo de la Mancha con Hep./Xil., (% xilol)	MC 8.302.7
Punto de Inflamación (°C)	MC 8.302.9
Punto de Ablandamiento (°C)	MC 8.302.16
Índice de Penetración (IP)	MC 8.302.18
Solubilidad en Tricloroetileno (%)	MC 8.302.11
<b>Ensayo de película delgada rotatoria</b>	<b>Método</b>
Perdida por calentamiento (%)	MC 8.302.33
Viscosidad de residuo a 60°C (Poise)	MC 8.302.24
Ductilidad de residuo a 25°C, 5cm/min (cm)	MC 8.302.8

### 3.2.1 Ensayos preliminares con pitch

Se llevaron a cabo ensayos generales para evaluar la modificación del asfalto mediante la adición de diferentes porcentajes de lignina. Estos ensayos tenían como objetivo proporcionar una primera aproximación sobre la respuesta del asfalto cuando se le modifica con lignina. Se incorporaron tres niveles de lignina: 0.5%, 2.5% y 5.0% con relación al peso del asfalto original. Para la preparación de las muestras, se siguieron los siguientes procedimientos:

La lignina se sometió a un proceso de secado a 60°C durante 24 horas. Este método fue seleccionado después de realizar pruebas a 100°C durante 24 horas, las cuales evidenciaron signos de quemadura superficial en la lignina. Luego, se tamizó y se utilizó la fracción bajo tamiz 100. Respecto del ligante, este se precalentó a 157°C por 1 hora para que se encontrara en estado líquido y así lograr la incorporación de la lignina.

En el proceso de incorporación de lignina, esta se agregó a temperatura ambiente, la cual era de 15°C. Además, cada 30 minutos se invirtió el sentido de rotación del mezclador para asegurar una distribución homogénea de la lignina. Posterior a las 4 horas de mezclado, se dejó enfriar y luego se llevó al laboratorio para realizar ensayos y determinar las propiedades requeridas según el Manual de Carreteras de Chile, Volumen 8 (MC, Vol.8)

### 3.2.2 Ensayos específicos con CA-24

Se llevaron a cabo ensayos específicos utilizando el ligante CA-24, con la adición de lignina en proporciones del 0.25% y 0.50% con respecto al peso del asfalto. Esta elección de porcentajes se basó en los resultados obtenidos en los ensayos preliminares realizados con pitch asfáltico. Para la preparación de las muestras, se siguieron los siguientes procedimientos.

La lignina fue sometida a un proceso de secado a 60°C durante 24 horas. Posteriormente, se tamizó y se utilizó la fracción que pasó por el tamiz 200. Esto se debió a que en ensayos anteriores se observó que algunas partículas de mayor tamaño no se incorporaron de manera efectiva. Respecto del ligante, este se precalentó a 157°C por 1 hora para que se encontrara en estado líquido que permitiera una adecuada incorporación de la lignina.

Durante el proceso de incorporación de lignina, esta se agregó a temperatura ambiente, la cual era de 15°C. Además, se realizó un cambio en el sentido de giro del mezclador cada 30 minutos para asegurar una distribución homogénea de la lignina. Posterior a las 4 horas de mezclado, se dejó enfriar y luego se llevó al laboratorio para realizar ensayos y determinar las propiedades requeridas según el MC, Vol.8.

### 3.3 Diseño de mezcla de asfalto en caliente

Con el ligante asfáltico que se obtuvo mejores resultados en los ensayos de laboratorio mencionados anteriormente, se procedió a realizar un diseño de mezcla de asfalto en caliente MAC. Este diseño se realizó según el método Marshall 8.302.47 del MC, Vol.8.

#### 3.3.1 Caracterización de áridos

Los áridos empleados en la mezcla en caliente incluyeron gravilla de ¾", gravilla de ½" y dos tipos de polvo de roca. Las gravillas y uno de los tipos de polvo de roca provienen de Confluencia, mientras que el otro tipo de polvo de roca proviene del Río Laja.

Para caracterizar estos áridos, se han obtenido los resultados de pruebas que incluyen granulometría y constantes físicas e hídricas, tales como el desgaste Los Ángeles y densidades, entre otros. Estas pruebas se presentan en la Tabla 3-2 junto con los métodos utilizados, tal como se especifica en el MC, Vol.8. En el Anexo 4.3 se encuentra el certificado de control de calidad con los resultados de las constantes que se presentan.

**Tabla 3-2** Ensayos para describir las propiedades de los áridos

<b>Constantes Físicas e hídricas</b>	<b>Método</b>
Densidad Aparente Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	MC 8.202.19
Densidad Real Seca (kg/m <sup>3</sup> )	MC 8.202.20 y 21
Densidad Neta (kg/m <sup>3</sup> )	MC 8.202.20 y 21
Desgaste Los Ángeles	MC 8.202.11
Partículas Chancadas (%)	MC 8.202.6
Partículas Lajeadas (%)	MC 8.202.6
Índice de Plasticidad	MC 8.102.4

Se siguió la banda granulométrica semi-densa IV-A-12, tal como se establece en el MC, Vol.5. Esta banda se recomienda para espesores de capa que oscilan entre 40 mm y 70 mm (Serviu, 2018). Para cumplir con esta banda granulométrica, se combinaron los áridos seleccionados en diversas proporciones, como se detalla en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3** Mezcla de áridos

Árido	Procedencia	Dosificación
Gravilla ¾"	Confluencia	23 %
Gravilla ½"	Confluencia	25 %
Polvo Roca	Confluencia	26 %
Polvo Roca	Rio Laja	26 %

Posteriormente, la mezcla de áridos también fue caracterizada en su granulometría y constantes físicas e hídricas. Los métodos utilizados para estas pruebas se detallan en la Tabla 3-4, conforme a lo establecido en el MC, Vol.8. En el Anexo 4.3 se encuentra el certificado de calidad con estos resultados.

**Tabla 3-4** Ensayos para describir constantes físicas e hídricas de la mezcla de áridos

Constantes Físicas e hídricas	Método
Densidad Aparente Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	MC 8.202.19
Densidad Real Seca (kg/m <sup>3</sup> )	MC 8.202.20 y 21
Densidad Neta (kg/m <sup>3</sup> )	MC 8.202.20 y 21
Desgaste Los Ángeles	MC 8.202.11
Desintegración con Sulfato de Sodio, F. Gruesa (%)	MC 8.202.17
Desintegración con Sulfato de Sodio, F. Fina (%)	MC 8.202.17
Partículas Chancadas (%)	MC 8.202.6
Partículas Lajeadas (%)	MC 8.202.6
Equivalente de arena (%)	MC 8.202.9
Sales Solubles (%)	MC 8.202.14
Adherencia Método Estático (%)	MC 8.302.29
Adherencia Método Dinámico (%)	MC 8.302.31
Adherencia Ríedel – Weber	MC 8.302.30
Índice de Plasticidad	MC 8.102.4

### 3.3.2 Diseño Marshall

Para el diseño de la mezcla, se aplicó el método 8.302.47 del MC, Vol.8. Este contempla la utilización del método 8.302.40 el cual es una adaptación de la Norma AASHTO T245-82. Para esto se realizaron tres probetas por cada contenido de ligante asfáltico a ensayar, estos fueron 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%, lo que da un total de 15 probetas. La temperatura de mezclado y compactación utilizada fue la determinada en el informe de laboratorio del ligante Anexo 4.1 y Anexo 4.2.

Se debió preparar una muestra suelta para determinar la densidad máxima teórica (DMM) según el método 8.302.37, MC, Vol.8. Una vez preparadas las probetas con los contenidos de ligante a ensayar y luego del período de curado, se ensayaron en el equipo Marshall convencional, y con los resultados se establece el contenido óptimo de emulsión. En la Tabla 3-5 se muestran las actividades realizadas a través del método Marshall aplicado.

**Tabla 3-5** Actividades realizadas del método Marshall

Actividades	
1	Preparar 1100 gramos de mezcla de áridos para cada probeta
2	Precalentar áridos por 16 horas a 157°C
3	Precalentar moldes por 16 horas a 157°C
4	Precalentar ligante modificado a 157 °C por 1 hora
5	Pesar áridos y agregar ligante según % en peso
6	Mezclar hasta que el ligante este bien distribuido, 2 minutos aproximadamente a 150 °C
7	Llenar molde y acomodar mezcla 15 veces en el perímetro y 10 veces en el centro
8	Compactar probetas con 75 golpes por cada lado a 147°C
9	Enfriar probetas a temperatura ambiente
10	Extraer probetas de sus moldes al día siguiente
11	Registrar diámetros y alturas de las probetas
12	Registrar masa seca de cada probeta
13	Sumergir probetas en agua durante 3 minutos
14	Registrar masa sumergida de cada probeta
15	Registrar masa superficialmente seca de cada probeta
16	Calcular densidad real de mezcla compactada
17	Ambientar probetas en baño de agua a temperatura de ensayo 60°C por 30 minutos
18	Ensayar probetas para estabilidad y fluencia Marshall
19	Determinar densidad máxima teórica DMM
20	Determinar contenido óptimo de emulsión



### 3.3.3 TSR Susceptibilidad a la humedad

Para llevar a cabo el análisis de resistencia al daño por humedad en la mezcla asfáltica, se siguió el método 8.302.6 del MC, Vol.8. Para este se prepararon seis probetas con un contenido de huecos correspondientes al rango de 6 % a 8 %. Para lograr esto por experiencia previa del laboratorio se compactan las probetas con 35 golpes por cada lado. En la Tabla 3-6 se muestran las actividades realizadas.

**Tabla 3-6** Actividades realizadas para determinar el daño por humedad

Actividades	
1	Preparar 1100 gramos de mezcla de áridos para cada probeta
2	Precalear áridos por 16 horas a 157°C
3	Precalear moldes por 16 horas a 157°C
4	Precalear ligante modificado a 157 °C por 1 hora
5	Pesar áridos y agregar ligante según % en peso
6	Mezclar hasta que el ligante este bien distribuido, 2 minutos aproximadamente a 150 °C
7	Llenar molde y acomodar mezcla 15 veces en el perímetro y 10 veces en el centro
8	Compactar probetas con 35 golpes por cada lado a 147°C
9	Enfriar probetas a temperatura ambiente
10	Extraer probetas de sus moldes al día siguiente
11	Registrar diámetros y alturas de las probetas
12	Registrar masa seca de cada probeta
13	Sumergir probetas en agua durante 3 minutos
14	Registrar masa sumergida de cada probeta
15	Registrar masa superficialmente seca de cada probeta
16	Calcular densidad real de mezcla compactada
17	Calcular vacíos de aire y elegir 3 probetas para acondicionar
18	Acondicionar las 3 probetas aplicando vacío por 5 minutos hasta lograr una saturación > 70%
19	Ambientar probetas en baño de agua a temperatura de 60°C por 24 horas
20	Determinar diámetro, espesores, peso SSS y peso sumergido de probetas acondicionadas
21	Ambientar las 3 probetas acondicionadas a 25°C por 60 minutos
22	Ambientar las 3 probetas no acondicionadas a 25°C por 30 minutos
23	Ensayar probetas a tracción

### 3.4 Diseño Estructural

Para realizar el diseño estructural se utilizó el método AASHTO-MOP, aplicado para dos alternativas de pavimentación. La primera alternativa corresponde a un pavimento con mezcla asfáltica en caliente modificada con lignina y la segunda corresponde a un pavimento tradicional con mezcla asfáltica en caliente. Para realizar el diseño estructural se consideró una misma capacidad estructural para ambas alternativas de pavimentación, con el fin de comparar su ciclo de vida.

Los coeficientes estructurales se determinaron para calcular el espesor de la carpeta de rodado, con el objetivo de igualar la capacidad estructural de ambos pavimentos y de esta manera poder comparar el impacto ambiental generado por cada alternativa.

#### 3.4.1 Método AASHTO MOP

El método AASHTO-MOP es el método establecido por la Dirección de Vialidad para el diseño de pavimentos flexibles en Chile. Este método de diseño se describe en la sección 3.604.1 del MC, Vol.3. El método AASHTO-MOP requiere el cálculo de los coeficientes estructurales para cada capa del pavimento. La expresión para el cálculo del coeficiente estructural de concretos asfálticos en función de la estabilidad Marshall se muestra en la ecuación 3.1 (MOP, 2022a).

$$a_1 = 0.0078 * EM^{0.441} \quad (3.1)$$

Donde  $EM$  es la estabilidad Marshall en Newton (N) y  $a_1$  es el coeficiente estructural de la capa asfáltica. Luego, con la ecuación 3.2 se obtiene el número estructural entregado por la capa asfáltica  $NE_{asf}$ , donde  $h_1$  es el espesor de la capa asfáltica en mm.

$$NE_{asf} = h_1 * a_1 \quad (3.2)$$

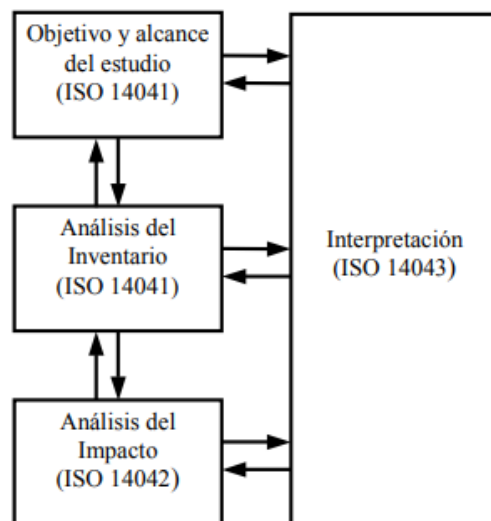
### 3.4.2 Supuestos de diseño

Para comparar el impacto ambiental entre un pavimento convencional y uno modificado, se debe tener en cuenta el espesor mínimo utilizado para la capa asfáltica con mezcla en caliente, la cual es de 5 cm. En base a esto, la mezcla con mayor estabilidad Marshall se evaluó con un espesor de 5 cm y el número estructural proporcionado por esta alternativa se igualó con el número estructural de la otra alternativa de pavimentación, obteniendo un espesor requerido para esta última alternativa. De esta manera, se determinó el espesor necesario para que ambas opciones de pavimentación ofrezcan la misma capacidad estructural. Este enfoque permite una comparación equitativa del impacto ambiental entre ambas alternativas.

### 3.5 Análisis del ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) es un método utilizado para evaluar el impacto ambiental de un material o producto a lo largo de las distintas etapas de su vida. El análisis llamado Streamlined Life Cycle Assessment (SLCA), se centra en la comparación de dos alternativas con ciertas diferencias (Vogtländer, 2023).

La metodología sobre el análisis del ciclo de vida de un producto o actividad se describe en la norma ISO 14040 y consta de cuatro fases principales, las cuales se muestran en el diagrama de la Figura 3-3. En esta sección se describe cada fase utilizada para llevar a cabo el análisis del ciclo de vida.



**Figura 3-3** Diagrama de las fases de análisis del ciclo de vida según ISO 14040 (2006)

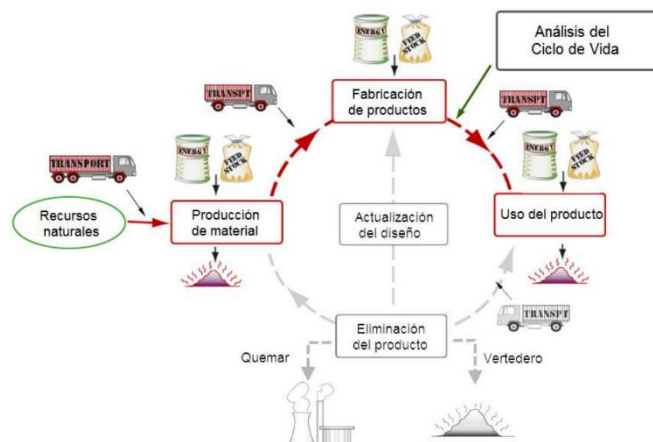
### 3.5.1 Objetivo y alcance del estudio

El primer paso de un análisis del ciclo de vida implica la definición de los objetivos del estudio. Es esencial detallar las razones que motivan la realización del análisis y la información que se busca obtener como resultado. Una vez que los objetivos del estudio están claros, se procede a describir las funciones que delimitan el sistema en análisis. En el caso de un análisis comparativo del ciclo de vida entre varios sistemas, se debe garantizar que todos cumplan la misma función.

Posteriormente, se aborda la definición de la unidad funcional, que constituye la base de cálculo para llevar a cabo los balances de materia y energía. En el caso de un análisis de ciclo de vida comparativo, se debe seleccionar una unidad funcional que refleje la función que interesa comparar.

Por último, se deben definir los límites del sistema, siendo una de las etapas críticas del análisis. En este contexto, se deben considerar diversos aspectos para definir el alcance del estudio. Esto implica la identificación de los procesos unitarios o subsistemas necesarios para la producción del producto en estudio, abarcando desde la obtención de recursos hasta todos los procesos de fabricación y transporte de componentes y materias primas, así como las diversas fases del ciclo de vida del producto terminado.

Se debe decidir que procesos y etapas del sistema se van a incluir en el estudio, así como los criterios que se utilizan para tal decisión y su compatibilidad con los objetivos del análisis. La Figura 3-4 muestra en colores las etapas del ciclo de vida que se compararán, mientras que en gris se representan las etapas consideradas equivalentes en el análisis.



**Figura 3-4** Etapas del ciclo de vida consideradas en el estudio Fuente: adaptado de (Ashby, 2018)

El tipo de análisis utilizado es el Streamlined LCA, debido a que optimiza el uso de recursos, enfocándose en las etapas del ciclo de vida de un producto, donde existe una diferencia significativa en cuanto al uso de recursos o emisiones debido a las modificaciones en el diseño de las propuestas frente a su caso base (Vogtländer, 2023).

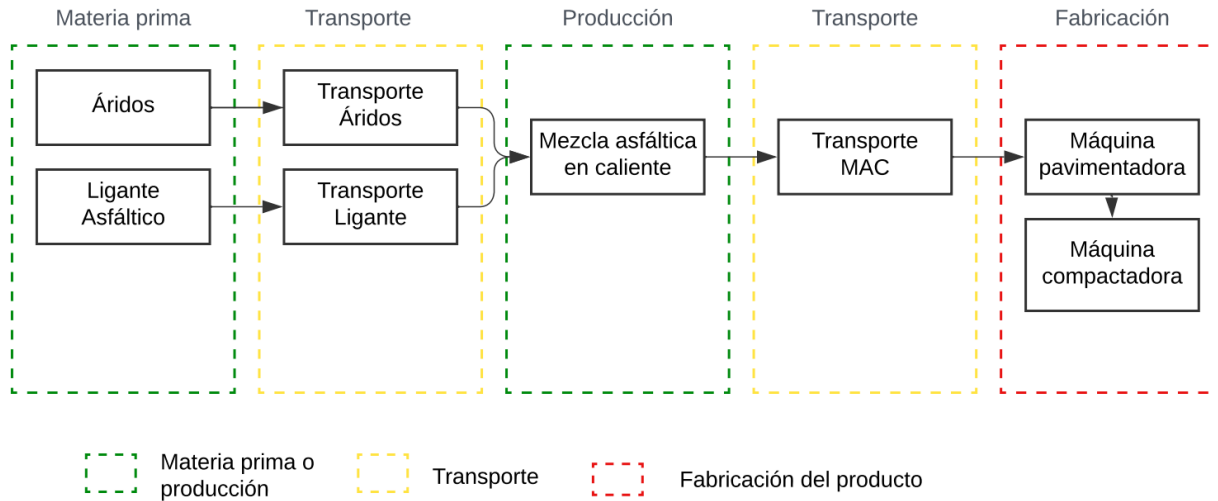
El objetivo y alcances de cada alternativa de pavimentación en estudio se detallan en la Tabla 3-7, teniendo en cuenta la función de cada sistema, la unidad funcional y los límites del sistema. El sistema "de la cuna a la puerta" abarca las tres primeras etapas del ciclo de vida del producto: la obtención de la materia prima y la producción del material, el transporte y la fabricación del producto. Las etapas de uso del producto y disposición final del mismo se consideran idénticas o equivalentes para ambas alternativas de pavimentación.

La etapa de uso del producto se mantiene constante para ambos tipos de pavimentos, ya que el tránsito durante su vida útil será el mismo y ambos presentan una resistencia estructural equivalente, determinada por el espesor y los coeficientes estructurales del pavimento.

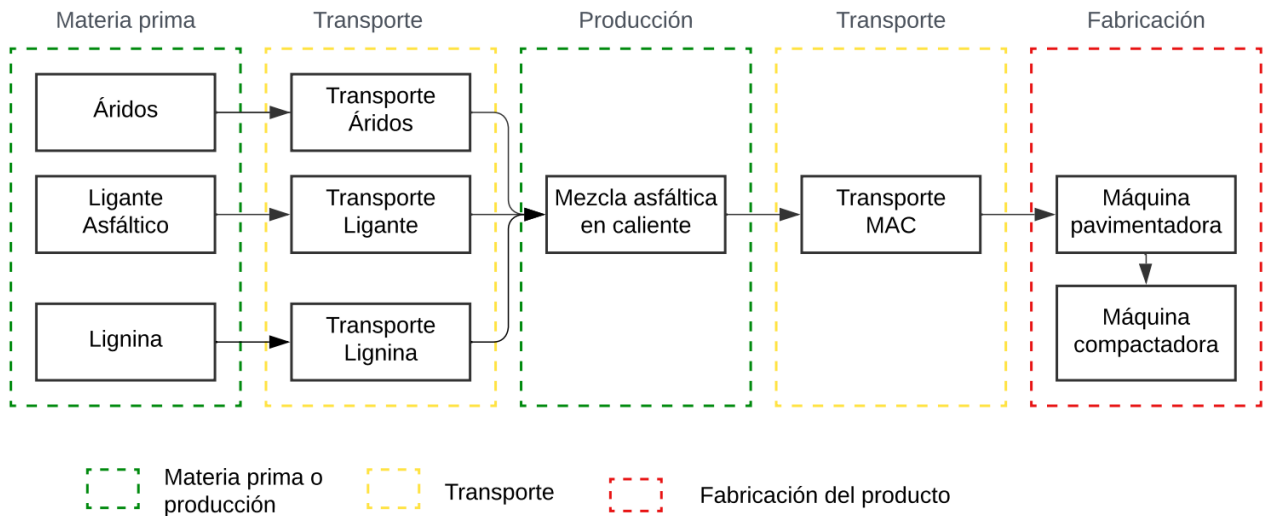
**Tabla 3-7** Objetivo y alcance de los sistemas en estudio

<b>Objetivo del análisis</b>		Evaluar analíticamente el ciclo de vida del cemento asfáltico modificado con lignina.
<b>Pavimento MAC Tradicional</b>	<b>Función del sistema</b>	Construcción de pavimento con mezcla asfáltica en caliente con betumen tradicional y espesor 53 mm
	<b>Unidad funcional</b>	Metros cuadrados de pavimento
	<b>Límites del sistema</b>	Sistema “de la cuna a la puerta” Procesos consideran emisiones al aire El pavimento tiene un espesor 53 mm Los camiones utilizados en transporte tienen una capacidad de 25 ton
<b>Pavimento MAC Modificado</b>	<b>Función del sistema</b>	Construcción de pavimento con mezcla asfáltica en caliente con bitumen modificado y espesor 50 mm
	<b>Unidad funcional</b>	Metros cuadrados de pavimento
	<b>Límites del sistema</b>	Sistema “de la cuna a la puerta” Procesos consideran emisiones al aire El pavimento tiene un espesor 50 mm Los camiones utilizados en transporte tienen una capacidad de 25 ton

La Figura 3-5 y Figura 3-6 exhiben los sistemas de construcción correspondientes a cada alternativa, proporcionando una visión detallada de todos los procesos considerados en este análisis, así como las distintas etapas del ciclo de vida asociadas. Estas etapas abarcan la obtención de materia prima, la producción, el transporte y la fabricación del producto final.



**Figura 3-5** Diagrama de los procesos considerados en el ACV para pavimento tradicional  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3-6** Diagrama de los procesos considerados en el ACV para pavimento modificado  
Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2 Análisis del inventario

El análisis de inventario es un procedimiento iterativo, ya que la incorporación de nuevos datos y el incremento del conocimiento durante el desarrollo del análisis permiten redefinir con mayor precisión los flujos de materiales y energía.

Esta fase comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los efectos ambientales adversos asociados a la unidad funcional (Antón Vallejo, 2004). De esta manera el análisis de inventario es un balance de materia y energía de un sistema, que implica la recopilación de datos y la realización de cálculos a fin de cuantificar las entradas y salidas del sistema bajo estudio. Las entradas corresponden a la materia prima y fuentes de energía utilizadas y las salidas son las emisiones al aire, agua y suelo, además del producto final.

Para llevar a cabo este estudio, se procedió a analizar el inventario mediante la búsqueda de los procesos mencionados anteriormente en bases de datos y la información disponible en investigaciones presentes en la literatura. Para el proceso de obtención de materia prima se utilizaron bases de datos disponibles, para el proceso de obtención de gravilla se utilizó la base de datos European Reference Life Cycle Database (ELCD) desarrollado por el Joint Research Center, actualizada en 2022. Los procesos de obtención del bitumen asfáltico desde una refinería de petróleo se obtuvieron de la base de datos Product Environmental Footprint (PEF) originada por la iniciativa de la European Commission's Single Market for Green Product, actualizada en el año 2019. El proceso de la confección de la mezcla asfáltica en caliente en planta, junto a los procesos de transporte y maquinaria se obtuvieron de la investigación realizada por Moliner Santistevé, (2013). El proceso de obtención de lignina kraft se obtuvo del estudio realizado por Venditti, (2017).

### 3.5.3 Análisis del impacto del ciclo de vida

En este análisis se utilizó el programa Open LCA en su versión 2.0 desarrollado por GreenDelta (2021). Esto debido a que además de ser de libre acceso, ha sido ampliamente utilizado en ACV enfocados en la comparación de alternativas, principalmente porque es adaptable y flexible, además ha sido utilizado en trabajos sobre análisis de pavimentos (César & Pradena, 2020).

En este programa se ingresaron los datos y procesos obtenidos de la etapa de análisis del inventario. Para generar el análisis de ciclo de vida se utilizó la herramienta *Tool for Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts* (TRACI), desarrollada por Environmental Protection Agency de Estados Unidos. La cual ha sido desarrollada para la medición de la sustentabilidad, la evaluación del impacto del ciclo de vida, la ecología industrial y la evaluación del impacto del diseño de procesos para desarrollar productos, procesos, instalaciones, empresas y comunidades cada vez más sustentables. TRACI permite una cuantificación de factores como agotamiento de la capa de ozono (*Ozone depletion*), calentamiento global (*Global warming*), acidificación (*Acidification*), eutrofización (*Eutrophication*), smog (*Smog*), efectos respiratorios en la salud humana (*Respiratory effects*), efectos cancerígenos y no cancerígenos en la salud humana (*Carcinogenics and Non carcinogenics*) y ecotoxicidad (*Ecotoxicity*) (Bare et al., 2012).

La metodología utilizada en TRACI utiliza la cantidad de la emisión química o del recurso utilizado y la potencia estimada del factor de estrés. La potencia estimada se basa en los mejores modelos y datos disponibles para cada categoría de impacto, este método fue obtenido a través de la base de datos Ecoinvent LCIA methods (Ecoinvent, 2016). En la Ecuación 3.3 se muestra la ecuación generalizada que utiliza TRACI (Bare et al., 2012).

$$I^i = \sum_{XM} CF_{XM}^i * M_{XM} \quad (3.3)$$

Donde:

$I^i$  : es el impacto potencial de todas las sustancias químicas (x) para una categoría de impacto específica de interés (i)

$CF_{XM}^i$  : es el factor de caracterización de la sustancia química (x) emitida al medio (m) para la categoría de impacto (i)

$M_{xm}$  : es la masa de sustancia química (x) emitida al medio (m)



### **3.5.4 Interpretación**

La fase final de un análisis de ciclo de vida implica la integración de los resultados obtenidos del análisis del inventario con la evaluación de impacto. A través de esta interpretación, es posible identificar en qué etapa del ciclo de vida del producto se originan las cargas ambientales más significativas y por tanto que puntos del sistema evaluado pueden mejorarse. En los casos de comparación de distintos productos se podrá determinar cuál presenta un comportamiento ambiental más favorable. (Antón Vallejo, 2004).

### **3.6 Conclusión**

En este capítulo se describe la metodología utilizada en el análisis experimental desarrollado, señalando los ensayos y análisis realizados a los ligantes y a la mezcla de asfalto en caliente, además se entregaron los datos de entrada relevantes para cada etapa. También describe la metodología implementada para realizar el análisis de impacto ambiental, describiendo los procesos considerados, el tipo de análisis y software utilizado. Se muestran restricciones y simplificaciones utilizadas para desarrollar cada uno de los objetivos de este estudio.

## CAPITULO 4 RESULTADOS

### 4.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos luego de haber aplicado la metodología descrita en la sección anterior. Estos resultados son la caracterización de ligantes modificados, el diseño Marshall de la mezcla asfáltica en caliente, el diseño estructural de dos alternativas de pavimentación y finalmente los resultados del impacto ambiental al comparar estas dos alternativas de pavimentación utilizando el programa OpenLCA.

### 4.2 Resultados del diseño de ligante modificado

#### 4.2.1 Resultados ensayos generales

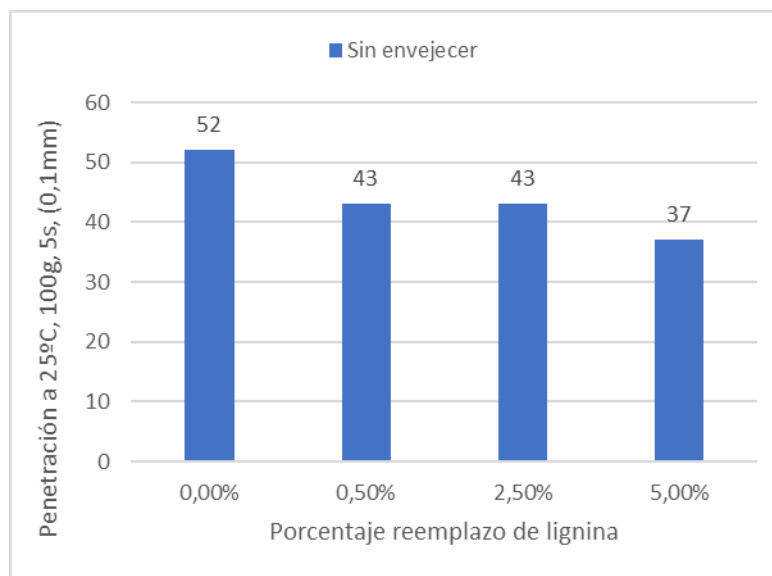
En la Tabla 4-1 se presentan los resultados de los ensayos realizados al ligante pitch asfáltico para obtener un acercamiento de la respuesta de este al adicionarle lignina. Los resultados se comparan con los requerimientos para el ligante CA-24 y se resaltan los que no cumplen con las especificaciones del MC, Vol.8.

**Tabla 4-1** Propiedades del ligante pitch asfáltico modificado

Ensayo	Requerimiento	0,0%	0,5%	2,5%	5,0%
Penetración a 25°C, 100g, 5s, (0,1mm)	Mín. 40	52	43	43	<b>37</b>
Viscosidad a 60°C, (Poise)	Mín. 2400	<b>2.053</b>	3.880	3.570	4.100
Punto de Ablandamiento, (°C)	Informar	51,6	52,0	52,0	52,4
Ductilidad a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	>150	<b>75</b>	<b>51</b>	<b>54</b>
Índice de Penetración, (IP)	-2,0 a +1,0	-0,7	-0,6	-1,1	-1,3
Mancha: Heptano-Xilol, (% Xilol)	Máx. 30	<25	<30	<30	<b>&gt;30</b>
Solubilidad en tricloroetileno, (%)	Mín. 99	99,9	99,2	99,9	<b>98,1</b>
Punto de Inflamación, (°C)	Mín. 232	272	310	286	298
<b>Película Delgada Rotatoria</b>					
Pérdida por calentamiento, (%)	Máx. 0,8	0,77	-0,7	-0,6	-0,5
Viscosidad a 60°C, 300 mm Hg, (Poise)	Informar	8.305	15.400	13.600	15.400
Ductilidad residuo, a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	<b>90</b>	<b>18</b>	<b>16</b>	<b>16</b>
Índice de Durabilidad	Máx. 4	4,0	4,0	3,8	3,8

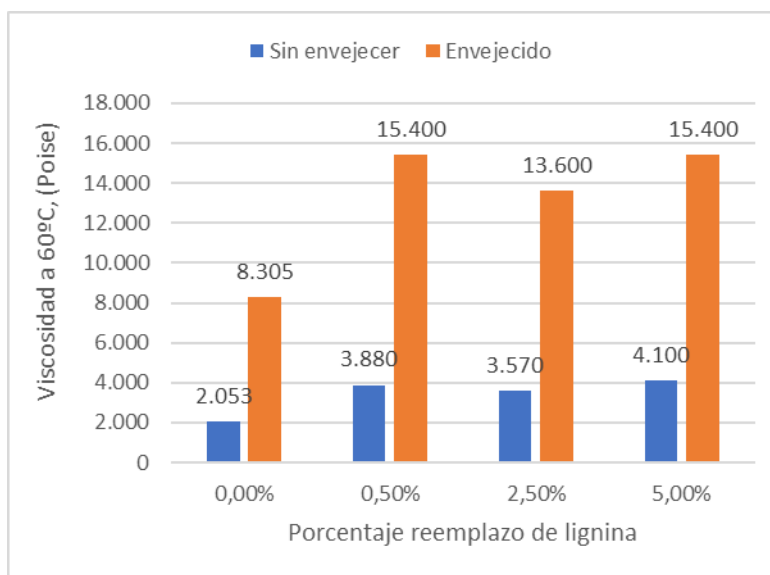
En la Figura 4-1 se grafican los resultados del ensayo de penetración realizado al ligante sin modificar y al ligante modificado en diferentes porcentajes de lignina. Como indican los resultados, la adición de lignina al ligante reduce el grado de penetración, lo cual es comparable a lo obtenido por Zahedi et al., (2020). Además, la reducción del grado de penetración en el ligante se puede encontrar en los enlaces polares en la lignina que organizan arreglos moleculares específicos en estructuras aromáticas bituminosas (Zahedi et al., 2020). Se crean enlaces más fuertes entre el ligante y las partículas de lignina al agregar el polímero de lignina, lo que aumenta la dureza de este.

Cabe destacar que cuando el ligante es reemplazado en 5% de su peso con lignina, este no cumple con el requerimiento mínimo para la prueba de penetración establecido en el MC, Vol.8.



**Figura 4-1** Resultados ensayo de penetración

Respecto a los resultados de la viscosidad cinemática del ligante base y modificado con diferentes porcentajes de lignina, estos se encuentran graficados en la Figura 4-2. Se muestran los resultados para el ligante sin envejecer y para el ligante después de la prueba de película delgada rotatoria la cual oxida el ligante, envejeciéndolo para tener un acercamiento a las propiedades que tendrá cuando se encuentre en operación.

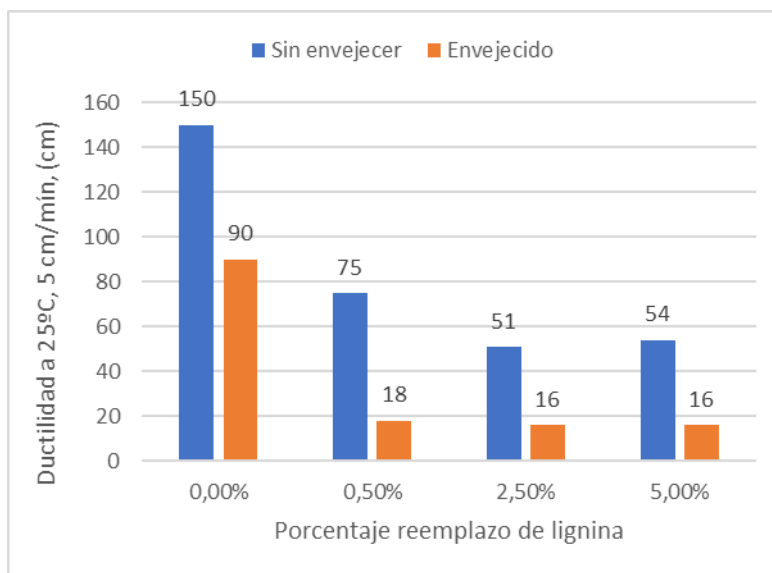


**Figura 4-2** Resultados ensayo de viscosidad

Los resultados muestran que la viscosidad cinemática del ligante sin envejecer aumenta al agregarle lignina, así mismo, luego de realizar la prueba de película delgada rotatoria, la viscosidad cinemática del ligante envejecido también aumenta cuando posee lignina. Este aumento puede deberse a que la estructura molecular de la lignina, en cuanto a su naturaleza aromática, tiene interacciones aromáticas con las estructuras aromáticas del ligante (Zahedi et al., 2020). En otras palabras, la lignina puede hacer que la estructura del ligante sea más coherente y resistente.

Estos hallazgos concuerdan con la literatura, ya que son consistentes con los resultados obtenidos en la investigación realizada por Yu et al. (2021), donde la adición de lignina también condujo a un aumento en la viscosidad cinemática del ligante estudiado, volviéndolo quebradizo y menos dúctil.

Los resultados del ensayo de ductilidad se realizaron sobre el ligante base y modificado con diferentes porcentajes de lignina, los resultados se muestran en la Figura 4-3, los cuales se realizaron para el ligante sin envejecer y para el ligante después de la prueba de película delgada rotatoria la cual envejece el ligante.



**Figura 4-3** Resultados de los ensayos de ductilidad

De acuerdo con los resultados de la Figura 4-3, se encontró que agregar lignina al ligante reduce significativamente la ductilidad, incluso en pequeñas cantidades. Donde un 0,5% de reemplazo de lignina provoca una disminución del 80% de ductilidad para el ligante envejecido. Esto se explica porque la adición del polímero de lignina aumenta la dureza del ligante, reduciendo la ductilidad.

#### 4.2.2 Resultados ensayos específicos

En la Tabla 4-2 se presentan los resultados de los ensayos realizados al ligante CA-24 para obtener la respuesta de este al adicionarle lignina. Los resultados se comparan con los requerimientos para el ligante CA-24 y se resaltan los que no cumplen con las especificaciones del MC, Vol.8.

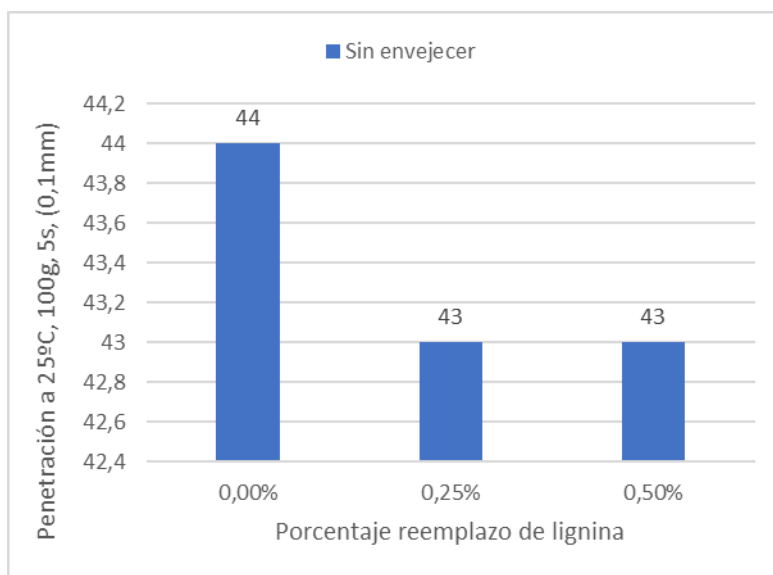
**Tabla 4-2** Propiedades del ligante CA-24 modificado

Ensayo	Requerimiento CA 24	0,0% Lignina	0,25% Lignina	0,5% Lignina
Penetración a 25°C, 100g, 5s, (0,1mm)	Mín. 40	44	43	43
Viscosidad a 60°C, (Poise)	Mín. 2400	2.930	3.750	3.770
Punto de Ablandamiento, (°C)	Informar	52,6	50,6	50,2
Ductilidad a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	>150	>150	>150
Índice de Penetración, (IP)	-2,0 a +1,0	-0,9	-1,4	-1,4
Mancha: Heptano-Xilol, (% Xilol)	Máx. 30	<30	<30	<30
Solubilidad en tricloroetileno, (%)	Mín. 99	99,8	100	100
Punto de Inflamación, (°C)	Mín. 232	314	280	280

<b>Película Delgada Rotatoria</b>				
Pérdida por calentamiento, (%)	Máx. 0,8	-0,5	-0,5	-0,4
Viscosidad a 60°C, 300 mm Hg, (Poise)	Informar	10.840	14.800	12.400
Ductilidad residuo, a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	>150	<b>90</b>	<b>70</b>
Índice de Durabilidad	Máx. 4	3,7	3,9	3,3

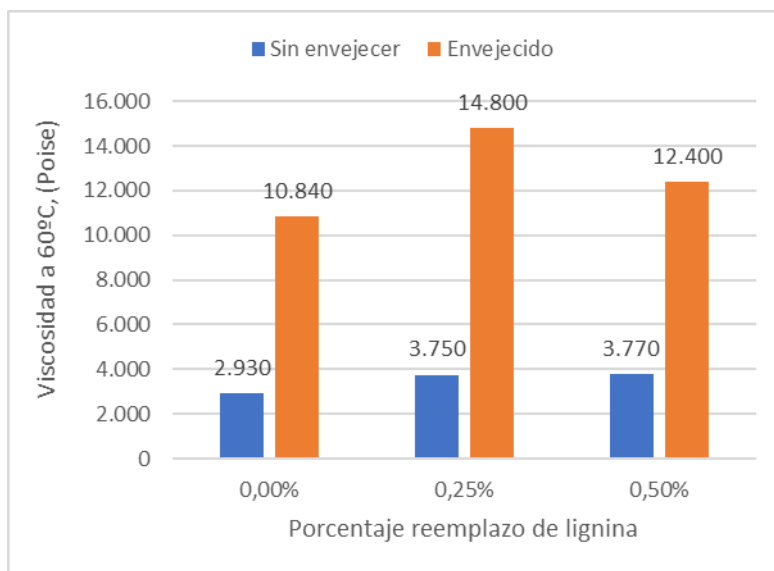
De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 4-2, se destaca que la ductilidad después de película delgada rotatoria es la única propiedad del ligante modificado que no se ajusta a las especificaciones establecidas en el MC, Vol.8.

En la Figura 4-4 se encuentran graficados los resultados del ensayo de penetración realizado al ligante CA-24 original y modificado con diferentes porcentajes de lignina. Los resultados indican que la inclusión de lignina provoca una ligera disminución en el grado de penetración, el cual es alrededor de un 2% de reducción para ambos porcentajes de reemplazo de lignina.



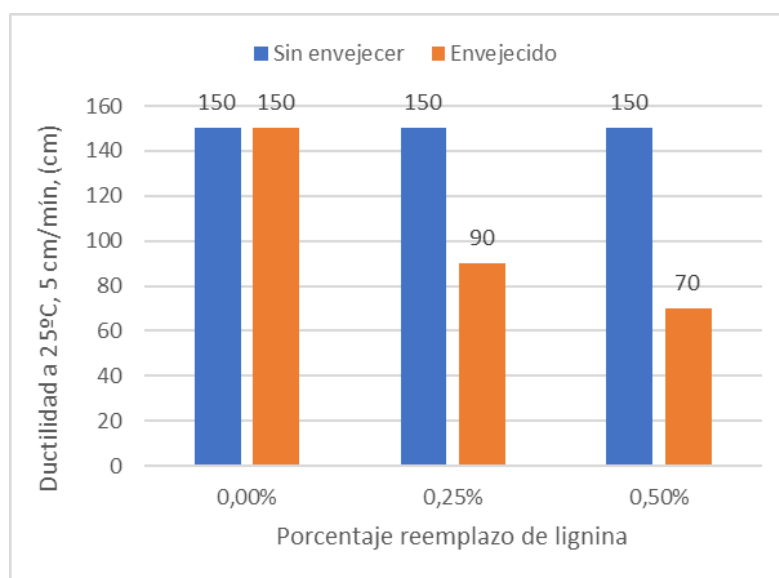
**Figura 4-4** Resultados del ensayo de penetración

Por otro lado, en la Figura 4-5 se encuentran graficados los resultados de los ensayos de viscosidad realizados al ligante sin envejecer y para el ligante después de la prueba de película delgada rotatoria la cual oxida el ligante, envejeciéndolo para tener un acercamiento a las propiedades que tendrá cuando esté en operación. Los resultados muestran una tendencia similar a los obtenidos en los ensayos preliminares, en donde la adición de lignina provoca un aumento de la viscosidad cinemática, para ambas condiciones del ligante.



**Figura 4-5** Resultados de los ensayos de viscosidad

Del mismo modo, los resultados para la ductilidad del ligante CA-24 se muestran en la Figura 4-6, en esta se encuentran los resultados para ambas condiciones del ligante, es decir envejecido y sin envejecer. Estos resultados muestran una clara disminución de la ductilidad del ligante envejecido, consistente con lo observado en los ensayos preliminares. Además, es notable que la reducción en la ductilidad es inferior al compararla con los resultados obtenidos al utilizar pitch asfáltico, ya que cuando se reemplazó un 0,5% de lignina la ductilidad del pitch asfáltico envejecido se vio reducida un 80%, mientras que en el CA-24 envejecido se obtuvo una reducción del 53%. Este hallazgo sugiere una respuesta diferenciada del ligante CA-24 en comparación con el pitch asfáltico.



**Figura 4-6** Resultados de los ensayos de ductilidad

### 4.3 Resultados del diseño de mezcla de asfalto en caliente (MAC)

#### 4.3.1 Características de los áridos

En la Tabla 4-3 se muestran los resultados de los ensayos que caracterizan las propiedades físicas e hídricas de la mezcla de áridos utilizados para el diseño de mezcla asfáltica en caliente.

**Tabla 4-3** Resultados de las propiedades de la mezcla de áridos

Ensayos	Resultados Mezcla	Exigencia	Método
		MC.V5, (Tabla 5.408.201.A-B)	
Densidad Aparente Suelta, (kg/m <sup>3</sup> )	<b>1.531</b>	N.A.	8.202.19
Densidad Real Seca, (kg/m <sup>3</sup> )	<b>2.626</b>	N.A.	8.202.20 y 21
Densidad Neta, (kg/m <sup>3</sup> )	<b>2.744</b>	N.A.	8.202.20 y 21
Desgaste Los Ángeles, (%)	<b>21</b>	Máx. 25	8.202.11
Desintegración con Sulfato de Sodio, F. Gruesa (%)	<b>1,2</b>	Máx. 12	8.202.17
Desintegración con Sulfato de Sodio, F. Fina (%)	<b>1,2</b>	Máx. 15	8.202.17
Partículas Chancadas, (%)	<b>98</b>	Mín. 90	8.202.6
Partículas Lajeadas, (%)	<b>0,3</b>	Máx. 10	8.202.6
Sales Solubles, (%)	<b>no contiene</b>	Máx. 2	8.202.14
Adherencia Método Estático, (%)	<b>&lt;95</b>	Mín. 95	8.302.29
Adherencia Método Dinámico, (%)	<b>&lt;95</b>	Mín. 95	8.302.31
Adherencia Riedel - Weber	<b>2 - 10</b>	Mín. 0 - 5	8.302.30
Índice de Plasticidad	<b>NP</b>	NP	8.102.4

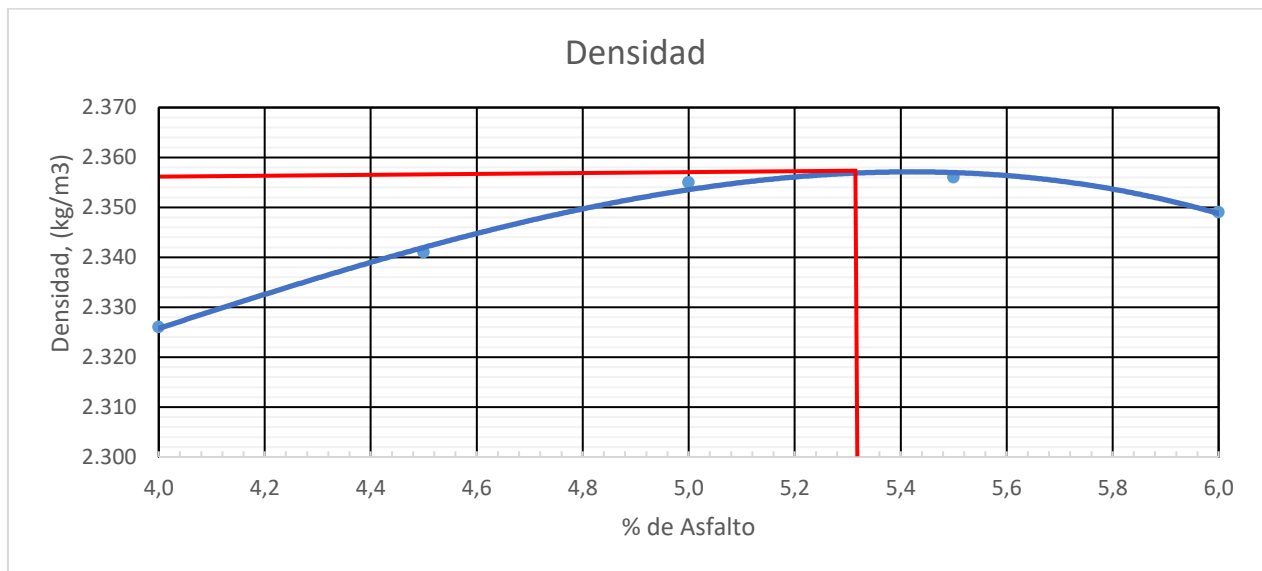
#### 4.3.2 Diseño Marshall

Se aplicó el método Marshall para diseñar dos mezclas asfálticas, una con el ligante tradicional y otra con el ligante modificado con lignina en un 0,5%. Se muestran tres gráficos de resultados por cada ligante, el primer gráfico (Figura 4-7) muestra los resultados de densidad por cada porcentaje de ligante ensayado, la cual fue medida en kg/m<sup>3</sup>. El segundo gráfico (Figura 4-8) muestra la estabilidad Marshall, la cual fue medida a través de la máquina Marshall y medida en Newton. El tercer gráfico (Figura 4-9) muestra los resultados de vacío de aire para cada porcentaje de ligante ensayado en porcentaje.

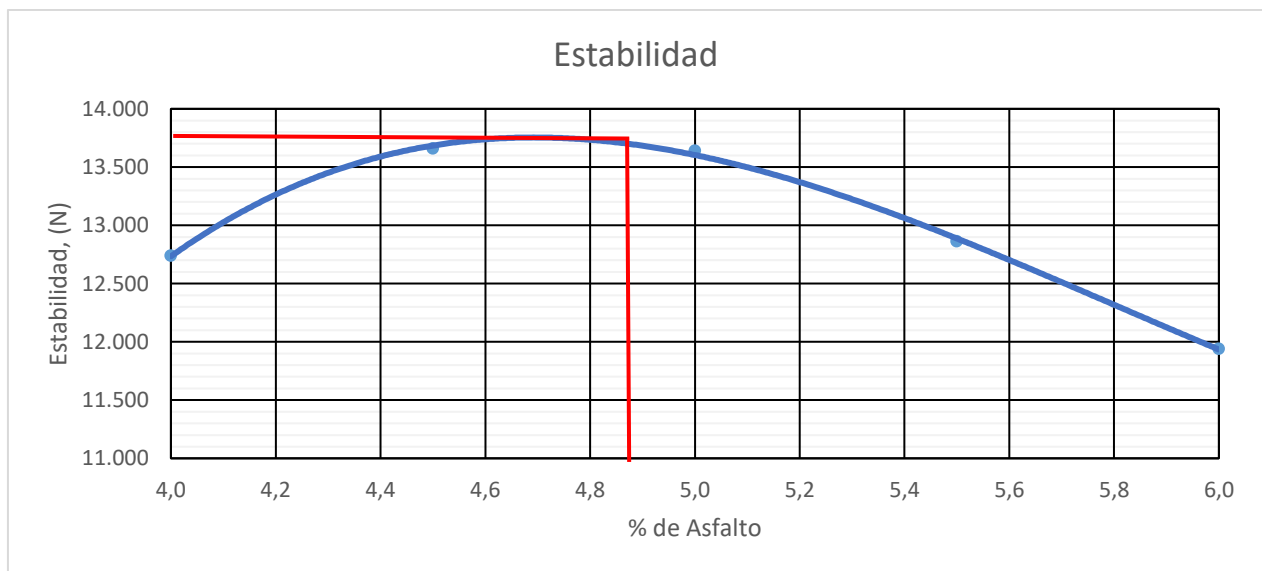


Para obtener el porcentaje óptimo de ligante asfáltico se utilizó el promedio entre el porcentaje de ligante relacionado al valor máximo de densidad, el porcentaje de ligante asociado al valor máximo de estabilidad Marshall y el porcentaje de ligante asociado al 4% de vacío de aire en la mezcla.

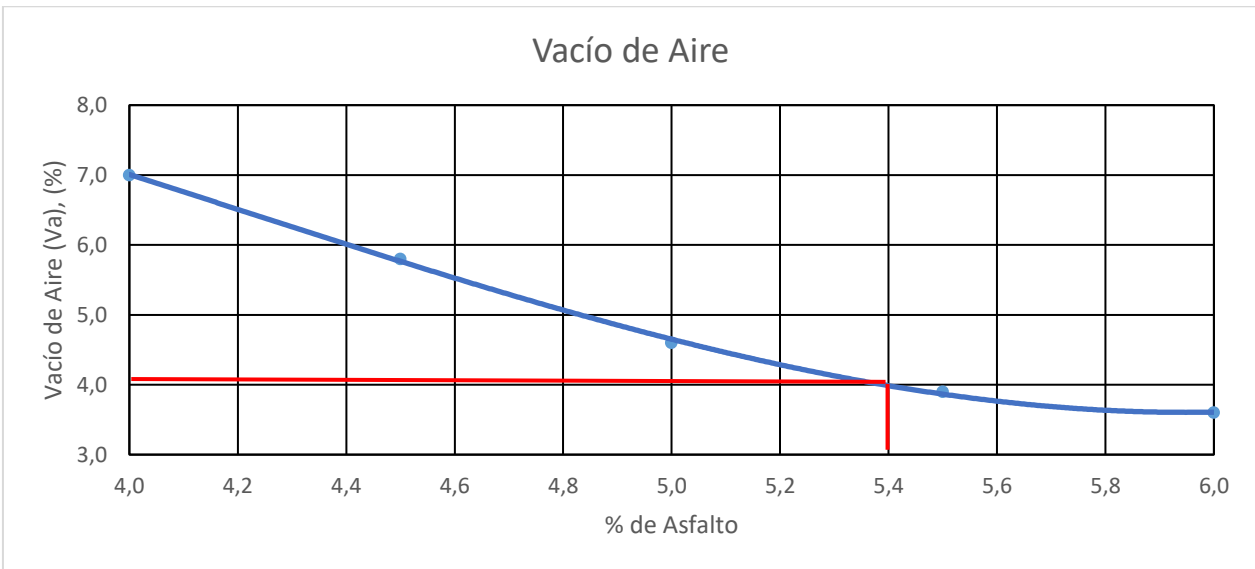
Los valores máximos de densidad y estabilidad están identificados con una línea roja horizontal sobre el grafico. Para el volumen de vacío, la línea horizontal indica el porcentaje óptimo requerido según el MC, Vol.8. Además, la línea vertical indica el porcentaje requerido de ligante asfáltico.



**Figura 4-7** Resultado de densidad utilizando el método Marshall con el ligante tradicional



**Figura 4-8** Resultados de estabilidad utilizando el método Marshall con el ligante tradicional

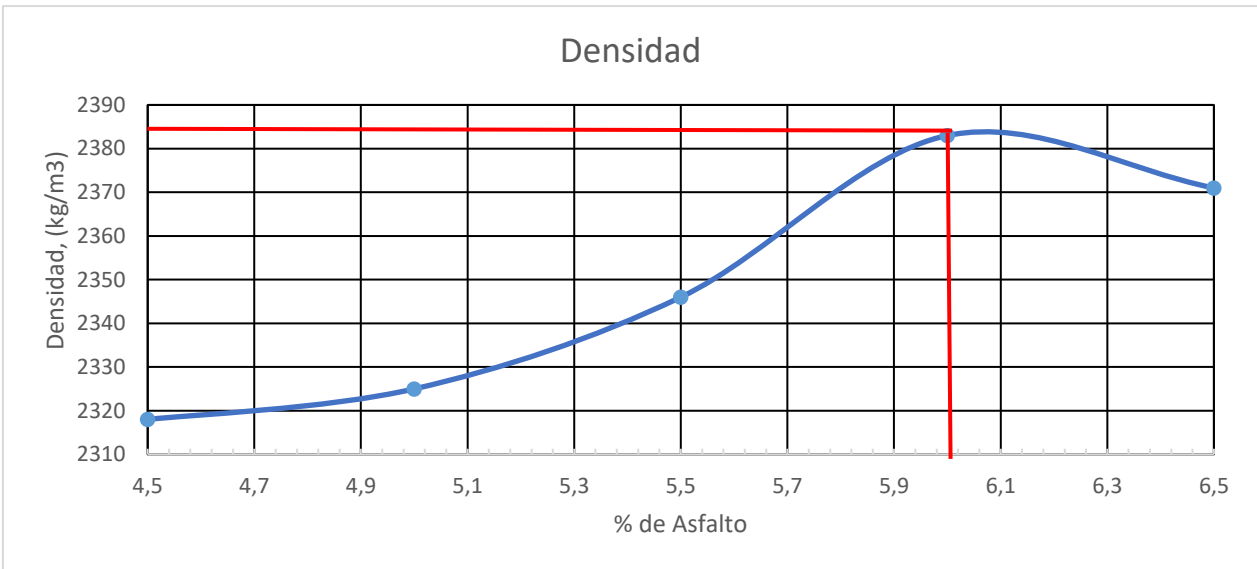


**Figura 4-9** Resultados de vacíos de aire utilizando el método Marshall con el ligante tradicional

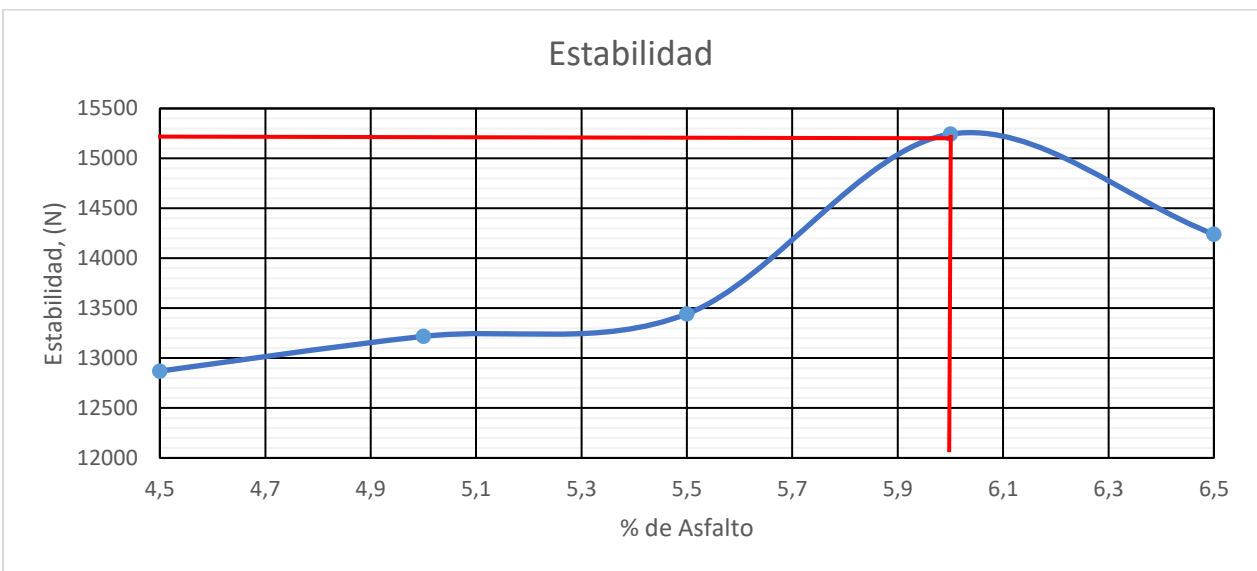
De la Figura 4-7 se observa que la mayor densidad se encuentra cercana al 5,3% de ligante con un valor de  $2.355 \text{ kg/m}^3$ , y a medida que el porcentaje de ligante aumenta, la densidad disminuye gradualmente. Respecto a la estabilidad, en la Figura 4-8 se muestra que los mayores valores se encuentran entre las cantidades de ligante de 4,6% y 4,9%, llegando a su máximo en el 4,9% de ligante con un valor de  $13.750 \text{ N}$ . Además, se aprecia que a medida que aumenta el porcentaje de ligante, la estabilidad disminuye drásticamente. Por otro lado, en la Figura 4-9 se observa que con un 5,4% de ligante se obtiene un 4% de vacíos de aire en la mezcla. Por lo tanto, al realizar el promedio se obtiene que el porcentaje óptimo de ligante asfáltico es 5,2%.

Finalmente, para la dosificación recomendada con un 5,2% de ligante, se obtiene una densidad de  $2.355 \text{ kg/m}^3$ , una estabilidad de  $13.350 \text{ N}$  y un 4,2% de vacíos de aire. Los resultados completos del diseño de la mezcla se encuentran en el Anexo 4.3, en donde se observan los datos de fluencia y vacíos en el agregado mineral, además las temperaturas de mezclado y compactación recomendadas.

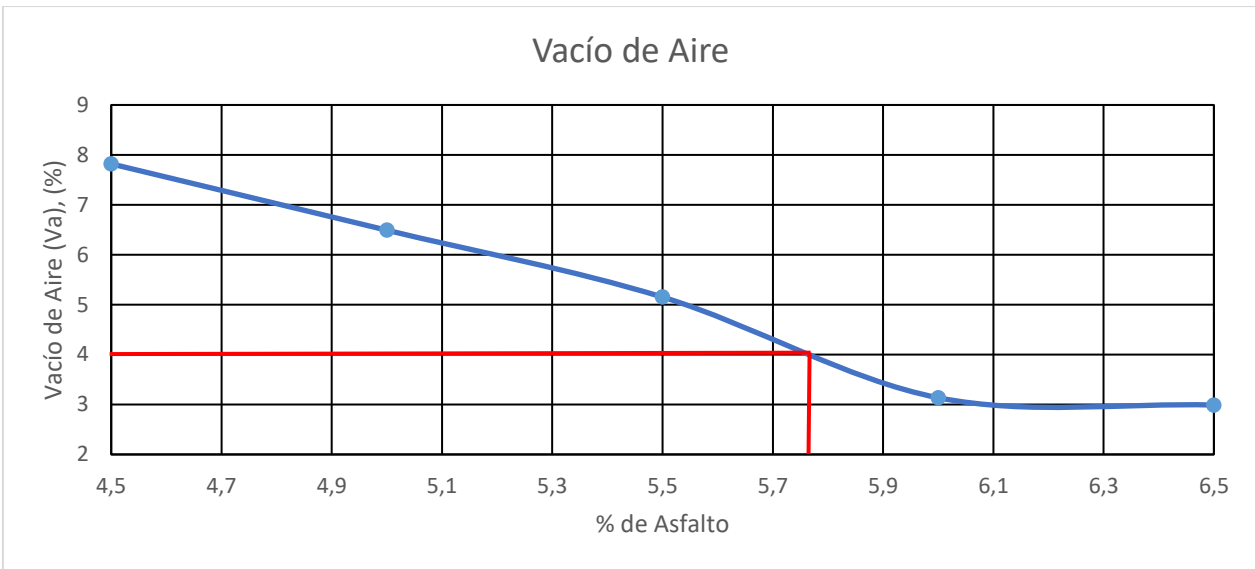
En la Figura 4-10, Figura 4-11 y Figura 4-12 se presentan los resultados correspondientes a densidad, estabilidad y vacíos de aire tras la implementación del método Marshall utilizando el ligante asfáltico modificado con lignina en un 0,5%.



**Figura 4-10** Resultado de densidad utilizando el método Marshall con el ligante modificado



**Figura 4-11** Resultados de estabilidad utilizando el método Marshall con el ligante modificado



**Figura 4-12** Resultados de vacíos de aire utilizando el método Marshall con el ligante modificado

En la Figura 4-10 se observa que la máxima densidad se encuentra cercana al 6,0% de ligante con un valor de  $2.385 \text{ kg/m}^3$ , a medida que el porcentaje de ligante aumenta, la densidad disminuye gradualmente. Respecto a la estabilidad, en la Figura 4-11 se muestra que llega a su máximo en el 6,0% de ligante con un valor de  $15.250 \text{ N}$ . Además, se aprecia que, al aumentar el porcentaje de ligante, la estabilidad disminuye drásticamente. Por otro lado, en la Figura 4-12 se aprecia que con un 5,8% de ligante se obtiene un 4% de vacíos de aire en la mezcla. Por lo tanto, al realizar el promedio se obtiene que el porcentaje óptimo de ligante asfáltico es 5,9%.

Así, para la dosificación recomendada con un 5,9% de ligante, se obtiene una densidad de  $2.378 \text{ kg/m}^3$ , una estabilidad de  $15.150 \text{ N}$  y un 3,4% de vacíos de aire. Los resultados completos del diseño de la mezcla se encuentran en el Anexo 4.5, en donde se observan los datos de fluencia y vacíos en el agregado mineral, además las temperaturas de mezclado y compactación recomendadas.

Finalmente, al comparar los resultados de aplicar el método Marshall, se observa que con el ligante modificado se obtiene una mezcla asfáltica de mayor densidad y estabilidad, pero utilizando un 0,7% más de ligante asfáltico.

### 4.3.3 Ensayo TSR

En la Tabla 4-4 se presentan los resultados correspondientes al ensayo de resistencia a la tensión indirecta (TSR) tras la implementación del método 8.302.6 del MC, Vol.8 utilizando el ligante asfáltico tradicional.

**Tabla 4-4** Resultados del ensayo TSR con ligante tradicional CA-24

	<b>Condición Húmeda</b>	<b>Condición Seca</b>	<b>Exigencia</b>
Promedio Vacío, (%)	7,7	7,9	Mín. 6 / Máx. 8
Promedio Saturación inicial, (%)	78	N.A.	Mín. 55 / Máx. 80
Promedio Saturación Final, (%)	91	N.A.	Mín. 80
Promedio Resistencia a la Tracción a 25°C, (kPa)	557	1005	Informar
<b>Resistencia a la Tracción, (%)</b>	<b>55</b>		Mín. 75

En la Tabla 4-5 se presentan los resultados correspondientes al ensayo de resistencia a la tensión indirecta (TSR) tras la implementación del método 8.302.6 del MC, Vol.8 utilizando el ligante asfáltico modificado con lignina.

**Tabla 4-5** Resultados del ensayo TSR con ligante modificado CA-24 + 0,5% lignina

	<b>Condición Húmeda</b>	<b>Condición Seca</b>	<b>Exigencia</b>
Promedio Vacío, (%)	8,0	8,1	Mín. 6 / Máx. 8
Promedio Saturación inicial, (%)	73	N.A.	Mín. 55 / Máx. 80
Promedio Saturación Final, (%)	78	N.A.	Mín. 80
Promedio Resistencia a la Tracción a 25°C, (kPa)	703	1227	Informar
<b>Resistencia a la Tracción, (%)</b>	<b>57</b>		Mín. 75

De la Tabla 4-4 y Tabla 4-5 se observa que para ambos ensayos de TSR, la resistencia a la tracción no cumple con el mínimo exigido en el manual de carreteras, el cual corresponde a un valor mínimo de 75%. Así mismo, al comparar los resultados de los ensayos, se evidencia que la incorporación de lignina conlleva a un aumento del 2% en la resistencia a la tracción.

## 4.4 Resultados del diseño estructural

### 4.4.1 Método AASHTO-MOP

En la Tabla 4-6 se muestran los resultados del diseño estructural tras aplicar la metodología descrita en la sección 3.4.

**Tabla 4-6** Resultados del método AASHTO-MOP

Alternativa	Estabilidad Marshall (N)	Coefficiente estructural	Espesor (mm)	Número estructural
MAC tradicional	13350	0,51	53	<b>27,2</b>
MAC modificada	15150	0,54	50	<b>27,2</b>

Los resultados de la Tabla 4-6 revelan que el coeficiente estructural de la mezcla asfáltica modificada es superior en comparación con la mezcla tradicional, por lo cual, para que ambas alternativas de pavimentación proporcionen la misma capacidad estructural al pavimento, se requiere un espesor de 53 mm para la mezcla asfáltica en caliente tradicional y un espesor de 50 mm para la mezcla asfáltica modificada en estudio.

## 4.5 Resultados análisis del impacto ambiental (ACV)

Con el fin de evaluar el impacto ambiental de las dos alternativas de pavimentación, específicamente la construcción de un pavimento con MAC modificada y la construcción de un pavimento con MAC tradicional, se utilizó el programa OpenLCA 2.0. En este proceso, se ingresaron los datos recopilados durante la fase de análisis de inventario para cada proceso y sistema. Posteriormente, mediante el método TRACI, se llevó a cabo un análisis detallado de cada sistema, comparando sus respectivos impactos ambientales potenciales.

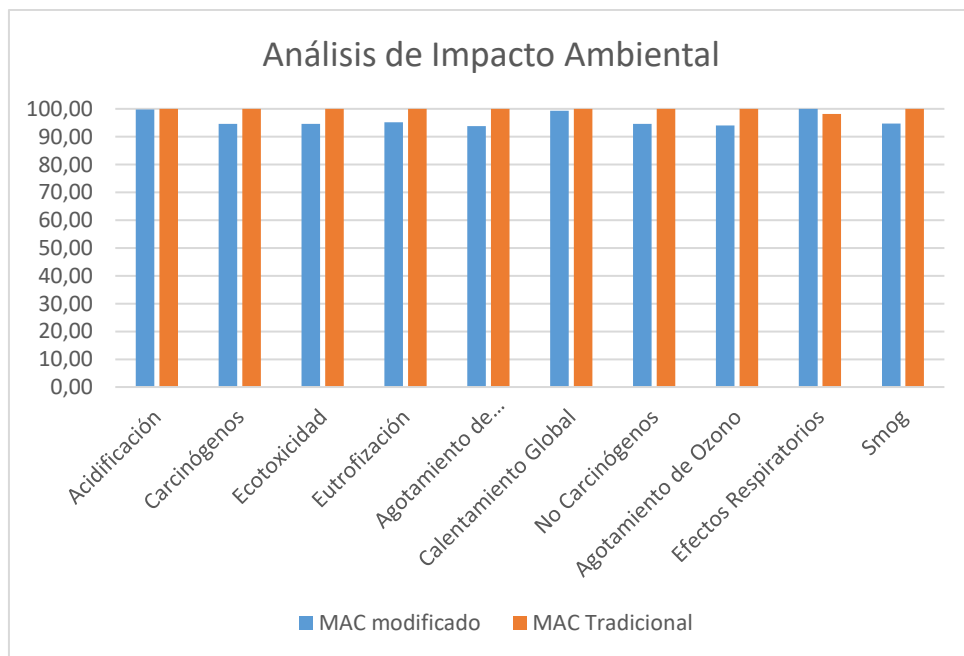
En la Tabla 4-7 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes indicadores de impacto ambiental y de salud humana, tras aplicar el método TRACI en el programa OpenLCA. Para este análisis de impacto ambiental se consideró que la confección de la mezcla asfáltica se realiza en una planta asfáltica en Concepción y que el lugar de aplicación se encuentra a 60 kilómetros de la planta.

Además, los resultados que se muestran son los obtenidos para la construcción de 1m<sup>2</sup> de pavimento, que es la unidad funcional utilizada en el estudio.

**Tabla 4-7** Resultados de los indicadores de impacto ambiental y salud humana para 1m<sup>2</sup> de asfalto

Indicador	Unidad	MAC Tradicional	MAC Modificado
Acidificación	kg SO2 eq	0,03855005	0,03848592
Carcinógenos	CTUh	3445612934	3258088288
Ecotoxicidad	CTUe	7,497E+16	7,089E+16
Eutrofización	kg N eq	0,00339061	0,00322707
Agotamiento de Combustibles Fósiles	MJ surplus	10,5085469	9,85086389
Calentamiento Global	kg CO2 eq	6,51242455	6,46529948
No Carcinógenos	CTUh	8,8034E+11	8,3242E+11
Agotamiento de Ozono	kg CFC-11 eq	1,3897E-07	1,3075E-07
Efectos Respiratorios	kg PM2.5 eq	0,00156725	0,00159639
Smog	kg O3 eq	0,66713555	0,63228139

En la Figura 4-13 se encuentra graficado los resultados del impacto ambiental de ambas alternativas de pavimentación, normalizado para facilitar la identificación de las diferencias porcentuales al comparar ambas alternativas.



**Figura 4-13** Resultados del impacto ambiental normalizados

Se observa de la Figura 4-13 que en nueve categorías de impacto la alternativa de pavimentación con MAC modificada presenta ventajas al compararla con la mezcla tradicional, así mismo, la reducción de impacto ambiental se encuentra alrededor de un 5% en promedio para las diferentes categorías. Es importante destacar que, aunque la alternativa de pavimentación con MAC modificada ofrece beneficios ambientales en la mayoría de las categorías evaluadas, se observa que, específicamente en la categoría de efectos respiratorios, la alternativa de pavimentación tradicional presenta un menor impacto ambiental. Así mismo, para la categoría de calentamiento global la disminución es de 0.8%.

#### 4.5.1 Análisis de sensibilidad

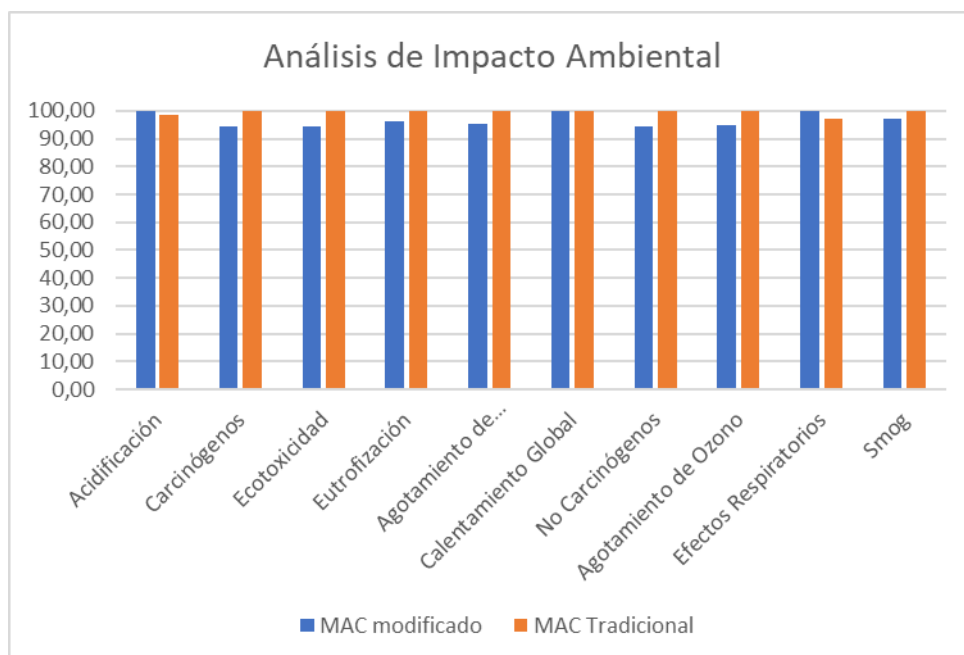
Al obtener los resultados del análisis del impacto ambiental se observa que las diferencias de impacto ambiental entre ambas alternativas de pavimentación no son significativas. Es por lo que se realizó un análisis de sensibilidad sobre la variable de distancia entre la planta asfáltica y el lugar de utilización de la mezcla.

Así, considerando que la mezcla debe viajar una distancia de 20 km desde la planta al lugar de utilización, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 4-8. De los cuales se observa que no existe una gran diferencia en los efectos ambientales para ambas alternativas de pavimentación.

**Tabla 4-8** Resultados de los indicadores de impacto ambiental y salud humana para 1m<sup>2</sup> de asfalto con una planta asfáltica a 20 kilómetros

Indicador	Unidad	MAC Tradicional	MAC Modificado
Acidificación	kg SO2 eq	0,0363371	0,03692015
Carcinógenos	CTUh	3445612934	3258088288
Ecotoxicidad	CTUe	7,497E+16	7,089E+16
Eutrofización	kg N eq	0,00325338	0,00312997
Agotamiento de Combustibles Fósiles	MJ surplus	9,92287878	9,43647607
Calentamiento Global	kg CO2 eq	6,4075601	6,39110293
No Carcinógenos	CTUh	8,8034E+11	8,3242E+11
Agotamiento de Ozono	kg CFC-11 eq	1,3366E-07	1,2699E-07
Efectos Respiratorios	kg PM2.5 eq	0,00151842	0,00156183
Smog	kg O3 eq	0,60608992	0,58908874





**Figura 4-14** Resultados del impacto ambiental normalizados con una planta asfáltica a 20 kilómetros

En la Figura 4-14 se muestran los resultados normalizados del análisis de sensibilidad realizado con respecto a la distancia desde la planta asfáltica al lugar de utilización de la mezcla asfáltica, de acá se observa que en ocho categorías de impacto la mezcla modificada presenta beneficios ambientales.

Al comparar los resultados del impacto ambiental con respecto a los obtenidos en la Tabla 4-7, se observa que existe una disminución en los efectos ambientales de cada una de las alternativas, pero no existe un cambio significativo entre ambas alternativas de pavimentación cuando deben viajar las mismas distancias al lugar de destino.

## 4.6 Conclusión

En este capítulo se observan los principales resultados de los ligantes modificados con lignina junto a los resultados del diseño de mezclas asfálticas, diseño estructural y los resultados del impacto ambiental utilizando la metodología del análisis de ciclo de vida.

Para ambos ligantes se obtuvo un aumento en la viscosidad cinemática cuando estaba sin envejecer y en estado envejecido, este aumento fue alrededor de un 80% para el pitch asfáltico y de un 30% para el ligante CA-24. Respecto a la ductilidad se vio reducida en ambas condiciones, en donde para el

ligante CA-24 disminuyó en un 53%, no cumpliendo con el mínimo requerido en las especificaciones, logrando un ligante más rígido y quebradizo. Comparando los diferentes porcentajes de reemplazo de lignina, se concluyó que un porcentaje de 0,5% permite alcanzar resultados más cercanos a las especificaciones.

Respecto del diseño de mezclas asfálticas, se observó que con la mezcla de ligante modificado se obtiene una mayor estabilidad Marshall y densidad, pero requiriendo un mayor porcentaje de ligante en la mezcla. De este modo, realizando el diseño estructural con estos resultados se obtuvo que para que ambas alternativas de pavimentación entreguen una misma capacidad estructural, la mezcla con ligante modificado requiere un espesor de 50 mm mientras que la mezcla tradicional requiere un espesor de 53 mm. Lo anterior revela que, al requerir un menor espesor la mezcla modificada puede conllevar a un menor requerimiento de materiales y de volúmenes de material para traslado.

Finalmente, respecto del análisis de impacto ambiental se puede concluir que existen beneficios ambientales en la mayoría de las categorías de impacto, siendo la categoría de calentamiento global la que entrega un cambio de 0,8%. Así mismo, luego del análisis de sensibilidad se puede concluir que cuando ambas alternativas de pavimentación deben viajar las mismas distancias al lugar de utilización, el uso de la mezcla modificada no influye de manera significativa en el análisis de impacto ambiental.

## CAPITULO 5 CONCLUSIONES

Mediante la evaluación en laboratorio de las propiedades del ligante modificado con lignina, se evidenció que la adición de lignina provoca una reducción del 53% en la ductilidad del ligante CA-24, lo que podría indicar una mayor fragilidad de este. Paralelamente, se observó que la viscosidad cinemática aumentó un 30% en promedio para el ligante envejecido y sin envejecer, indicando que la lignina refuerza la coherencia del ligante. Al comparar estos resultados con las especificaciones para los ligantes en Chile, se recomienda utilizar un reemplazo de lignina en porcentajes bajos, alrededor de 0,5% en peso.

En relación con el diseño de mezclas asfálticas, se ha observado que aquellas con ligante modificado presentan una mayor densidad y estabilidad, indicando una mejora en la resistencia estructural a expensas de un aumento de 0,7% de ligante. Este aumento en densidad sugiere beneficios para la durabilidad y estabilidad de la mezcla. No obstante, tras someter las mezclas asfálticas con lignina al análisis de susceptibilidad a la humedad, se concluyó que la adición de lignina al 0,5% mejora la resistencia a la tensión indirecta en un 2%. A pesar de este avance, estas mezclas aún no cumplen con los requerimientos mínimos especificados en Chile. Por ende, se debe considerar la incorporación de un mejorador de adherencia para garantizar su aplicación.

En esta misma línea, al diseñar un pavimento asfáltico con los resultados del diseño Marshall, se deduce que la mezcla asfáltica modificada requiere un espesor inferior para ofrecer la misma capacidad estructural, según los resultados del método AASHTO-MOP. En el caso particular de este estudio, la mezcla modificada con lignina requiere 3 mm menos de espesor, lo que se traduce en una reducción en la cantidad de materiales y, por ende, en menores volúmenes de transporte asociados. Este hallazgo no solo implica eficiencia en términos de recursos, sino también potenciales beneficios económicos y medioambientales en el desarrollo de proyectos de pavimentación.

En el contexto de la evaluación analítica del ciclo de vida de la mezcla asfáltica modificada con lignina mediante OpenLCA 2.0, se evidencia una disminución general en el impacto ambiental en comparación con la pavimentación tradicional. La alternativa con mezcla asfáltica modificada presenta mejoras en nueve categorías de impacto ambiental, con una reducción promedio de alrededor del 5%, incluyendo una disminución del 0,8% en las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el

calentamiento global, el cual fue medido a través de la emisión de kg de CO<sub>2</sub> equivalente de cada pavimento.

Aunque la mezcla con ligante modificado ofrece beneficios ambientales en la mayoría de las categorías, se observan resultados divergentes en la categoría de efectos respiratorios. Además, tras el análisis de sensibilidad, se concluye que, cuando ambas alternativas de pavimentación deben viajar las mismas distancias al lugar de utilización, este factor no influye de manera significativa en la evaluación del ciclo de vida. Estos resultados subrayan la importancia de adoptar un enfoque de contextualización al evaluar el impacto ambiental de las alternativas de pavimentación.

La disparidad observada en los porcentajes óptimos de reemplazo de lignina, en comparación con estudios previos de la literatura, podría derivarse de las variaciones en los métodos de extracción y los procesos a los que fue sometida la lignina. De acuerdo con Mikkonen, (2020) “la estructura de la lignina varía notablemente entre especies de madera, e incluso entre partes de árboles individuales, por lo que existe una baja probabilidad de que dos macromoléculas de lignina sean idénticas. Además, la lignina es altamente reactiva y está fuertemente unida a la celulosa y las hemicelulosas en la pared celular. Por lo tanto, su estructura a menudo se altera durante el aislamiento”.

Finalmente, para profundizar en la comprensión de la utilización de lignina como reemplazo del ligante asfáltico, se propone la exploración de futuras líneas de investigación centradas en la realización de ensayos dirigidos a evaluar de manera más detallada los efectos a largo plazo de la lignina en la durabilidad y rendimiento de los pavimentos asfálticos en el tiempo, en donde se puede ver afectada la propiedad viscoelástica de este y la disminución de los ciclos de carga efectivos. Además, se propone investigar el comportamiento de nuevas mezclas asfálticas modificadas con mayores porcentajes de reemplazo de lignina.

**REFERENCIAS**

- Antón Vallejo, M. A. (2004). *CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA*. <http://hdl.handle.net/10803/6827>
- Araneda, M. E. (2021). *María Elena Araneda, Asfalto Reciclado en frío con Emulsión Asfáltica*.
- Ashby, M. (2018). *Unit 12. Eco Design and the Eco Audit Tool. Introducing students to life-cycle thinking*.
- Bare, Jane, Young, D., & Hopton, M. (2012). *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI) TRACI version 2.1 User's Guide*.  
[www.epa.gov/research](http://www.epa.gov/research)
- Bradley, A. H. (2021). Principal Researcher. Transportation and Infrastructure, FPInnovations Papa-Masseck Thiam. In *PMP. Senior Researcher. Transportation and Infrastructure*.  
FPInnovations.
- César, A., & Pradena, M. (2020). Sustainable engineering: Load transfer characterization for the structural design of Thinner concrete pavements. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(21), 1–19.  
<https://doi.org/10.3390/su12219153>
- Gaudenzi, E., Cardone, F., Lu, X., & Canestrari, F. (2023). The use of lignin for sustainable asphalt pavements: A literature review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 362). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129773>
- Ihobe. (2009). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y HUELLA DE CARBONO*.
- Meijer, J. R., Huijbregts, M. A. J., Schotten, K. C. G. J., & Schipper, A. M. (2018). Global patterns of current and future road infrastructure. *Environmental Research Letters*, *13*(6).  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabd42>
- Mikkonen, K. S. (2020). Strategies for structuring diverse emulsion systems by using wood lignocellulose-derived stabilizers. In *Green Chemistry* (Vol. 22, Issue 4, pp. 1019–1037). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c9gc04457d>
- Moliner Santistevé, E. (2013). CONTRIBUTIONS TO THE ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF ROAD TRANSPORT. In *Castellón (Spain)*.
- MOP. (2022a). *VOLUMEN N° 3 INSTRUCCIONES Y CRITERIOS DE DISEÑO MANUAL DE CARRETERAS*.
- MOP. (2022b). *VOLUMEN N° 8 ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE MUESTREO, ENSAYE Y CONTROL MANUAL DE CARRETERAS*.

- Serviu. (2018). *CAP. N° 0-INTRODUCCIÓN CAP N° 0 0 MANUAL DE PAVIMENTACIÓN Y AGUAS LLUVIAS 2 0.1 INTRODUCCIÓN 2 0.2 PARTICIPACIÓN 2 0.3 ALCANCE 4 0.4 MARCO LEGAL 4.*
- Su, N., Xiao, F., Wang, J., Cong, L., & Amirkhanian, S. (2018). Productions and applications of bio-asphalts – A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 183, pp. 578–591). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118>
- Vogtländer, J. G. (2023). *A practical guide for students, designers and business managers A “Fast Track” guide to LCA (6°)*. [www.ecocostsvalue.com](http://www.ecocostsvalue.com)
- Xu, G., Wang, H., & Zhu, H. (2017). Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin. *Construction and Building Materials*, 151, 801–808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.151>
- Yu, J., Vaidya, M., Su, G., Adhikari, S., Korolev, E., & Shekhovtsova, S. (2021). Experimental study of soda lignin powder as an asphalt modifier for a sustainable pavement material. *Construction and Building Materials*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123884>
- Zahedi, M., Zarei, A., Zarei, M., & Janmohammadi, O. (2020). Experimental determination of the optimum percentage of asphalt mixtures reinforced with Lignin. *SN Applied Sciences*, 2(2). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2041-8>
- Zhang, Y., Wang, X., Ji, G., Fan, Z., Guo, Y., Gao, W., & Xin, L. (2020). Mechanical performance characterization of lignin-modified asphalt mixture. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/app10093324>
- Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. In *European Polymer Journal* (Vol. 54, Issue 1, pp. 18–38). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>

## ANEXOS

## Anexo 4.1 Informe de laboratorio de Pitch Asfáltico

	<b>INFORME DE LABORATORIO</b>	<b>Versión: 02</b>
		<b>Página 1 de 2</b>

<b>Nº Informe</b>	<b>ILC, 2023-23</b>
-------------------	---------------------

<b>Solicitado por</b>	Universidad de Concepción
<b>Descripción</b>	Mezclas de Pich con Lignina
<b>Fecha</b>	24 de marzo de 2023
<b>Realizado por</b>	LAT - LCC

**Descripción, Análisis y Ensayos:**

1. Mezclas con Lignina como mejorador de propiedades del asfalto.

<b>Ensayo</b>	<b>Requerimiento CA 24</b>	<b>0,5% Lignina</b>	<b>2,5% Lignina</b>	<b>5,0% Lignina</b>
Penetración a 25°C, 100g, 5s, (0,1mm)	Mín. 40	43	43	<b>37</b>
Viscosidad a 60°C, (Poise)	Mín. 2400	3.880	3.570	4.100
Punto de Ablandamiento, (°C)	Informar	52,0	52,0	52,4
Ductilidad a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	<b>75</b>	<b>51</b>	<b>54</b>
índice de Penetración, (IP)	Mín. -2,0 / Máx. 1,0	-0,6	-1,1	-1,3
Mancha: Heptano-Xilol, (% Xilol)	Máx. 30	<30	<30	<b>&gt;30</b>
Solubilidad en tricloroetileno, (%)	Mín. 99	99,2	99,9	<b>98,1</b>
Punto de Inflamación, (°C)	Mín. 232	310	286	298
<b>Película Delgada Rotatoria</b>				
Pérdida por calentamiento, (%)	Máx. 0,8	-0,7	-0,6	-0,5
Viscosidad a 60°C, 300 mm Hg, (Poise)	Informar	15.400	13.600	15.400
Ductilidad residuo, a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	<b>18</b>	<b>16</b>	<b>16</b>
índice de Durabilidad	Máx. 4	4,0	3,8	3,8



INFORME DE LABORATORIO

Versión: 02

Página 2 de 2

**Anexo:**

Ensayos asfalto Base Pitch partida 24588:

Ensayo	Especificación	Enap	Recepción
Penetración a 25°C, 100g, 5s, (0,1mm)	Mín. 40	52	53
Viscosidad a 60°C, (Poise)	Mín. 1400 / Máx. 2399	2.053	2.260
Punto de Ablandamiento, (°C)	Informar	51,6	50,8
Ductilidad a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	>150	>150
Índice de Penetración, (IP)	Mín. -2,0 / Máx. 1,0	-0,7	-0,9
Mancha: Heptano-Xilol, (% Xilol)	Máx. 30	<25	<25
Punto de Inflamación, (°C)	Mín. 232	267	272
<b>Película Delgada Rotatoria</b>			
Pérdida por calentamiento, (%)	Máx. 0,8	0,77	-0,8
Viscosidad a 60°C, 300 mm Hg, (Poise)	Informar	8.305	9.600
Ductilidad residuo, a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	90	98 – 123
Índice de Durabilidad	Máx. 4	4,0	<b>4,2</b>



## Anexo 4.2 Informe de laboratorio de Cemento Asfáltico (CA-24)

	<b>INFORME DE LABORATORIO</b>	<b>Versión: 02</b>
		<b>Página 1 de 2</b>

<b>Nº Informe</b>	<b>ILC, 2023-56</b>
-------------------	---------------------

<b>Solicitado por</b>	Universidad de Concepción
<b>Descripción</b>	Mezclas de CA 24 con Lignina
<b>Fecha</b>	21 de septiembre de 2023
<b>Realizado por</b>	LAT - LCC

**Descripción, Análisis y Ensayos:**

1. Mezclas con Lignina como mejorador de propiedades del asfalto.

<b>Ensayo</b>	<b>CA 24</b>	<b>0,5% Lignina</b>	<b>0,25% Lignina</b>
Penetración a 25°C, 100g, 5s, (0,1mm)	Mín. 40	45	43
Viscosidad a 60°C, (Poise)	Mín. 2400	3.770	3.750
Punto de Ablandamiento, (°C)	Informar	50,2	50,6
Ductilidad a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	>150	>150
Indice de Penetración, (IP)	Mín. -2,0 / Máx. 1,0	-1,4	-1,4
Mancha: Heptano-Xilol, (% Xilol)	Máx. 30	<30	<30
Solubilidad en tricloroetileno, (%)	Mín. 99	100	100
Punto de Inflamación, (°C)	Mín. 232	280	280
<b>Película Delgada Rotatoria</b>			
Pérdida por calentamiento, (%)	Máx. 0,8	-0,4	-0,5
Viscosidad a 60°C, 300 mm Hg, (Poise)	Informar	12.400	14.800
Ductilidad residuo, a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	<b>70</b>	<b>90</b>
Indice de Durabilidad	Máx. 4	3,3	3,9
<b>Curva de Viscosidad</b>			
Viscosidad a 120°C, (cP)	Informar	1.160	1.143
Viscosidad a 135°C, (cP)	Informar	480	473
Viscosidad a 150°C, (cP)	Informar	249	237
T° Frabricación de Mezcla a 1,7 Poise, (°C)	Informar	156,7	155,6
T° Compactación Mezcla a 2,8 Poise, (°C)	Informar	147,0	146,2
Densidad a 25°C	Informar	1,0307	1,0300

	<b>INFORME DE LABORATORIO</b>	<b>Versión: 02</b>
		<b>Página 2 de 2</b>

**Anexo:**

Ensayos asfalto Base CA 24 partida 3325:

<b>Ensayo</b>	<b>Especificación</b>	<b>Recepción</b>
Penetración a 25°C, 100g, 5s, (0,1mm)	Mín. 40	44
Viscosidad a 60°C, (Poise)	Mín. 2.400	2.930
Punto de Ablandamiento, (°C)	Informar	52,6
Ductilidad a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	>150
Indice de Penetración, (IP)	Mín. -2,0 / Máx. 1,0	-0,9
Mancha: Heptano-Xilol, (% Xilol)	Máx. 30	<30
Solubilidad en Tricloroetileno, (%)	Mín. 99	99,8
Punto de Inflamación, (°C)	Mín. 232	314
<b>Película Delgada Rotatoria</b>		
Pérdida por calentamiento, (%)	Máx. 0,8	-0,5
Viscosidad a 60°C, 300 mm Hg, (Poise)	Informar	10.840
Ductilidad residuo, a 25°C, 5 cm/mín, (cm)	Mín. 100	>150
Indice de Durabilidad	Máx. 4	3,7
<b>Curva de Viscosidad</b>		
Viscosidad a 120°C, (cP)	Informar	953
Viscosidad a 135°C, (cP)	Informar	408
Viscosidad a 150°C, (cP)	Informar	214
T° Frabricación de Mezcla a 1,7 Poise, (°C)	Informar	153,9
T° Compactación Mezcla a 2,8 Poise, (°C)	Informar	143,9

## Anexo 4.3 Informe MAC tradicional



N° Informe: INFORME CLASA

29-02-2024

Página: 1

**INFORME DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE  
CARPETA RODADURA**

Solicitante	Universidad de Concepción
Dirección	Edmundo Larenas 219, Concepción, Chile

**I. IDENTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES****1.1. Áridos**

Tipo de Material	Gravilla 3/4	Gravilla 1/2	Polvo Roca 1	Polvo Roca 2
Muestreo áridos				
Procedencia	Confluencia	Confluencia	Confluencia	Río Laja

**1.2. Cemento Asfáltico**

Procedencia	CLASA S.A.
Cemento Asfáltico	CA-24

**II. ANÁLISIS DE LOS AGREGADOS PÉTREOS****2.1. Granulometría**

Tamices		Gravilla 3/4	Gravilla 1/2	Polvo Roca 1	Polvo Roca 2
mm	(ASTM)				
20	3/4"	100	100	100	100
12,5	1/2"	30	100	100	100
10	3/8"	2	77	100	100
5	N° 4	0	2	95	97
2,5	N° 8	0	1	65	68
0,63	N° 30	0	0	30	31
0,315	N° 50	0	0	21	21
0,16	N° 100	0	0	14	14
0,08	N° 200	0	0	10	10

**III. MEZCLA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS****3.1. Dosificación de áridos**

Tipo de árido	Proporción en la mezcla
Gravilla 3/4	23%
Gravilla 1/2	25%
Polvo Roca 1	26%
Polvo Roca 2	26%

**3.2. Granulometría de la Mezcla de materiales**

Tamices		Resultados Mezcla	Banda Especificada	Banda de Trabajo
mm	(ASTM)		IV - A - 12	
20	3/4"	100	100	100
12,5	1/2"	84	80 - 95	79 - 89
10	3/8"	72	70 - 85	67 - 77
5	N° 4	50	43 - 58	45 - 55
2,5	N° 8	35	28 - 42	31 - 39
0,63	N° 30	16	13 - 24	13 - 19
0,315	N° 50	11	8 - 17	8 - 14
0,16	N° 100	7	6 - 12	5 - 9
0,08	N° 200	5	4 - 8	3,5 - 6,5




N° Informe: INFORME CLASA

29-02-2024

Página: 2

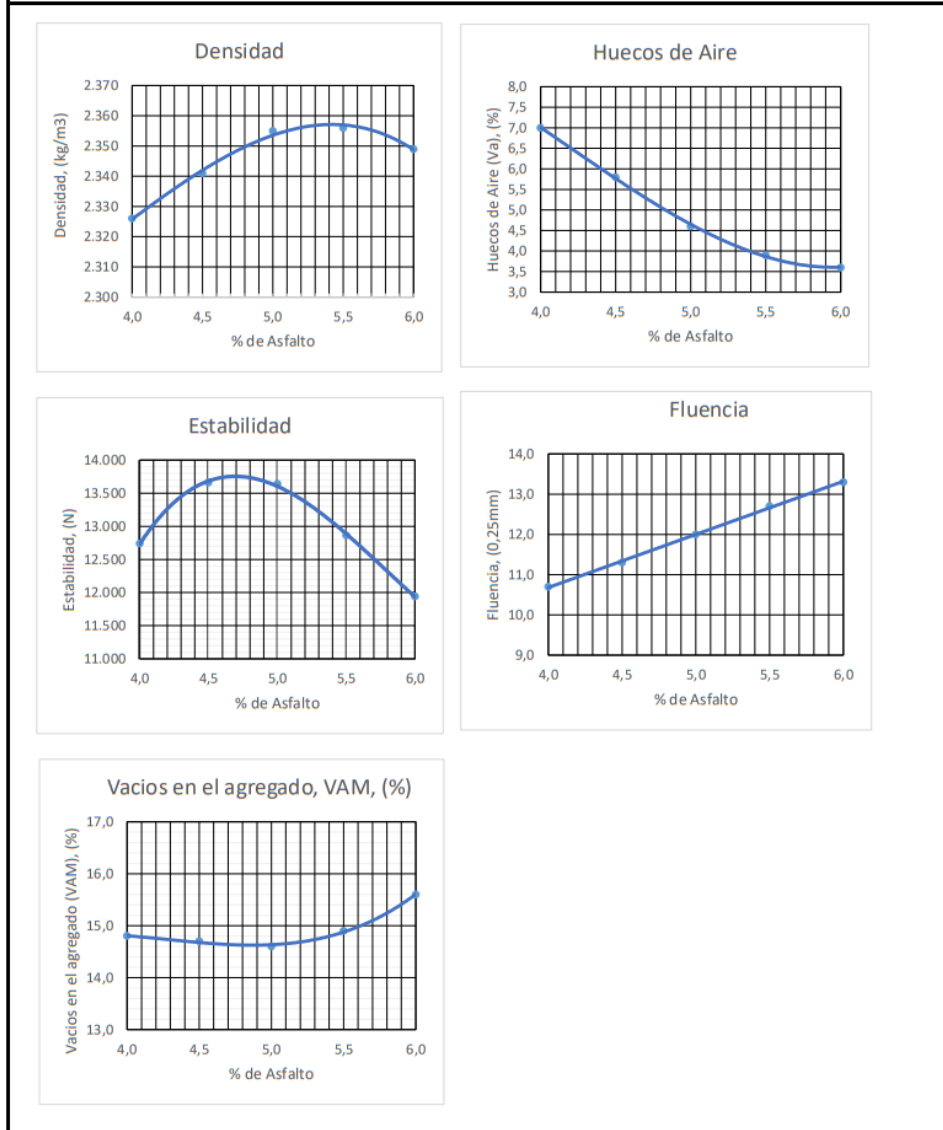
<b>IV. DISEÑO</b>					
<b>4.1 Características de la Mezcla Asfáltica</b>					
Mezcla	Resultado	Método			
Densidad Máxima de la Mezcla - DMM, (kg/m <sup>3</sup> )	<b>2.469</b>	8.302.37			
Densidad Efectiva, (kg/m <sup>3</sup> )	<b>2.656</b>	8.302.47			
Densidad Real Seca, (kg/m <sup>3</sup> )	<b>2.626</b>	8.202.20 y 21			
Asfalto Absorbido, (%)	<b>0,44</b>	8.302.47			
Densidad CA 24 a 25°C, (kg/m <sup>3</sup> )	<b>1.025</b>	8.302.2			
<b>4.2 Diseño Marshall</b>					
Asfalto Referido al Agregado, (%)	<b>4,0</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>	<b>5,5</b>	<b>6,0</b>
Densidad, (kg/m <sup>3</sup> )	2.326	2.341	2.355	2.356	2.349
Densidad Máx. DMM, (kg/m <sup>3</sup> )	2.503	2.486	2.469	2.453	2.437
Huecos de Aire, Va, (%)	7,0	5,8	4,6	3,9	3,6
Vacios en el agregado, VAM, (%)	14,8	14,7	14,6	14,9	15,6
Huecos llenos con asfalto, V <sub>LL</sub> , (%)	52	60	68	74	77
Fluencia, (0,25mm)	10,7	11,3	12,0	12,7	13,3
Estabilidad, (Newton)	12.740	13.661	13.640	12.863	11.940
<b>4.3 Determinación del Contenido Óptimo de Asfalto</b>					
Asfalto para Máxima Estabilidad, (%)	4,9				
Asfalto para Máxima Densidad, (%)	5,3				
Asfalto para 4% de Huecos de Aire, (%)	5,4				
<b>Contenido óptimo de Asfalto, (%)</b>	<b>5,2</b>				
<b>V. DOSIFICACIÓN RECOMENDADA</b>					
	Resultado	Exigencia	Método		
		MC.V5, (Tabla 5.408.203.A y B)			
Contenido óptimo de Asfalto, (%)	<b>5,2</b>	Informar	8.302.40 y 47		
Densidad de diseño Marshall, (kg/m <sup>3</sup> )	<b>2.355</b>	Informar	8.302.40 y 48		
Estabilidad, (Newton)	<b>13.350</b>	Min. 9000	8.302.40 y 49		
Fluencia, (0,25mm)	<b>12,2</b>	Min. 8 - Máx. 16	8.302.40 y 50		
Huecos de Aire, Va, (%)	<b>4,2</b>	Min. 3 / Máx. 5	8.302.40 y 51		
Vacios en el agregado, VAM, (%)	<b>14,7</b>	Min. 14	8.302.40 y 52		
Temperatura de Mezclado, (°C)	<b>155</b>	Informar	8.302.40 y 53		
Temperatura de Compactación, (°C)	<b>145</b>	Informar	8.302.40 y 54		

LABORATORIO  
ENSAJO DE MATERIALES  
Y ASISTENCIA TÉCNICA  
CLASA S.A.

  
M<sup>a</sup> Elena Araneda N.  
Ingeniera Civil  
Jefe Asistencia Técnica  
CLASA S.A.



**Anexo: Gráficos de Diseño Marshall**



## Anexo 4.4 Informe TSR de MAC tradicional



N° Informe: UdeC TSR

29-02-2024

Página: 1

**INFORME ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (TSR)**

<b>Solicitante</b>	Universidad de Concepción
<b>Dirección</b>	Edmundo Larenas 219, Concepción, Chile

<b>RESULTADOS</b>			
	<b>Condición Húmeda</b>	<b>Condición Seca</b>	<b>Exigencia</b>
Promedio Vacío, (%)	7,7	7,9	Mín. 6 / Máx. 8
Promedio Saturación inicial, (%)	78	N.A.	Mín. 55 / Máx. 80
Promedio Saturación Final, (%)	91	N.A.	Mín. 80
Promedio Resistencia a la Tracción a 25°C, (kPa)	557	1005	Informar
<b>Resistencia a la Tracción, (%)</b>	<b>55</b>		Mín. 75

LABORATORIO  
ENSAYO DE MATERIALES  
Y ASISTENCIA TÉCNICA  
CLASA S.A.

M<sup>a</sup> Elena Araneda N.  
Ingeniera Civil  
Jefe Asistencia Técnica  
CLASA S.A.

## Anexo 4.5 Informe MAC modificada con 0,5% de lignina



N° Informe: CLASA UdeC MAC

29-02-2024

Página: 1

**INFORME DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE  
CARPETA RODADURA**

<b>Solicitante</b>	Universidad de Concepción
<b>Dirección</b>	Edmundo Larenas 219, Concepción, Chile

<b>I. IDENTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES</b>					
<b>1.1. Áridos</b>					
Tipo de Material	G 3/4	G 3/8	PR 1	PR 2	
Muestreo áridos	4 de septiembre 2023				
Procedencia	Confluencia	Confluencia	Confluencia	Río Laja	
<b>1.2. Cemento Asfáltico</b>					
Procedencia	CLASA S.A.				
Cemento Asfáltico	CA-24 + 0,5% Lignina				
<b>II. ANÁLISIS DE LOS AGREGADOS PÉTREOS</b>					
<b>2.1. Granulometría</b>					
Tamices		Gravilla 3/4	Gravilla 3/8	Polvo Roca Confluencia	Polvo Roca Río Laja
mm	(ASTM)				
25	1"				
20	3/4"	100			
12,5	1/2"	30	100		
10	3/8"	2	77	100	100
5	N° 4	0	2	95	97
2,5	N° 8	0	1	65	68
0,63	N° 30	0	0	30	31
0,315	N° 50	0	0	21	21
0,16	N° 100	0	0	14	14
0,08	N° 200	0	0	10	10
<b>2.2. Constantes Físicas e Hídricas</b>					
Ensayos	Gravilla 3/4	Gravilla 3/8	Polvo Roca Confluencia	Polvo Roca Laja	
Densidad Aparente Suelta, (kg/m³)	1.438	1.382	1704	1582	
Densidad Real Seca, (kg/m³)	2.699	2.634	2569	2611	
Densidad Neta, (kg/m³)	2.769	2.715	2765	2730	
Desgaste Los Angeles, (%)	20	19	23	23	
Grado de ensayo					
Desintegración con Sulfato de Sodio, F. Gruesa (%)	1,2	1,2	1,2	1,2	
Desintegración con Sulfato de Sodio, F. Fina (%)	1,2	1,2	1,2	1,2	
Partículas Chancadas, (%)	92	99	100	100	
Partículas Lajeadas, (%)	0,0	0,2	0,0	0,9	
Adherencia Método Estático, (%)	95	95	95	95	
Adherencia Método Dinámico, (%)	95	95	95	95	
Adherencia Riedel - Weber	2 - 10	2 - 10	2 - 10	2 - 10	
Índice de Plasticidad	NP	NP	NP	NP	



N° Informe: CLASA UdeC MAC  
29-02-2024  
Página: 2

<b>III. MEZCLA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS</b>				
<b>3.1. Dosificación de áridos</b>				
Tipo de árido		Proporción en la mezcla		
Gravilla 3/4		23%		
Gravilla 3/8		25%		
Polvo Roca 1		26%		
Polvo Roca 2		26%		
<b>3.2. Granulometría de la Mezcla de materiales</b>				
Tamices		Resultados Mezcla	Banda Especificada	Banda de Trabajo
mm	(ASTM)	IV - A - 12		
25	1"			
20	3/4"	100	100	100
12,5	1/2"	83	80 - 95	78 - 88
10	3/8"	78	70 - 85	73 - 83
5	N° 4	51	43 - 58	46 - 56
2,5	N° 8	39	28 - 42	35 - 43
0,63	N° 30	18	13 - 24	15 - 21
0,315	N° 50	12	8 - 17	9 - 15
0,16	N° 100	8	6 - 12	6 - 10
0,08	N° 200	6	4 - 8	4,3 - 7,3
<b>3.3. Propiedades Físicas e Hídricas de la Mezcla de materiales</b>				
Ensayos	Resultados Mezcla	Exigencia	Método	
		MC.V5, (Tabla 5.408.201.A y B)		
Densidad Aparente Suelta, (kg/m³)	1.531	N.A.	8.202.19	
Densidad Real Seca, (kg/m³)	2.626	N.A.	8.202.20 y 21	
Densidad Neta, (kg/m³)	2.744	N.A.	8.202.20 y 21	
Desgaste Los Ángeles, (%)	21	Máx. 25	8.202.11	
Desintegración con Sulfato de Sodio, F. Gruesa (%)	1,2	Máx. 12	8.202.17	
Desintegración con Sulfato de Sodio, F. Fina (%)	1,2	Máx. 15	8.202.17	
Partículas Chancadas, (%)	98	Mín. 90	8.202.6	
Partículas Lajeadas, (%)	0,3	Máx. 10	8.202.6	
Sales Solubles, (%)	0	Máx. 2	8.202.14	
Adherencia Método Estático, (%)	< 95	Mín. 95	8.302.29	
Adherencia Método Dinámico, (%)	< 95	Mín. 95	8.302.31	
Adherencia Riedel - Weber	2 - 10	Mín. 0 - 5	8.302.30	
Índice de Plasticidad	NP	NP	8.102.4	



<b>IV. DISEÑO</b>					
<b>4.1 Características de la Mezcla Asfáltica</b>					
Mezcla	Resultado	Método			
Densidad Máxima de la Mezcla - DMM, (kg/m <sup>3</sup> )	2.493	8.302.37			
Densidad Efectiva, (kg/m <sup>3</sup> )	2.684	8.302.47			
Densidad Real Seca, (kg/m <sup>3</sup> )	2.626	8.202.20 y 21			
Asfalto Absorbido, (%)	0,44	8.302.47			
Densidad CA 24 a 25°C, (kg/m <sup>3</sup> )	1,031	8.302.2			
<b>4.2 Diseño Marshall</b>					
Asfalto Referido al Agregado, (%)	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Densidad, (kg/m <sup>3</sup> )	2.318	2.325	2.346	2.383	2.371
Densidad Máx. DMM, (kg/m <sup>3</sup> )	2.510	2.493	2.477	2.460	2.445
Huecos de Aire, Va, (%)	7,8	6,5	5,2	3,1	3,0
Vacios en el agregado, VAM, (%)	15,7	15,4	15,2	14,4	15,2
Huecos llenos con asfalto, V <sub>LL</sub> , (%)	50,1	58,0	66,1	78,2	80,3
Fluencia, (0,25mm)	10,0	10,0	10,3	13,0	14,0
Estabilidad, (Newton)	12.870	13.218	13.443	15.243	14.241
<b>4.3 Determinación del Contenido Óptimo de Asfalto</b>					
Asfalto para Máxima Estabilidad, (%)	<b>6,0</b>				
Asfalto para Máxima Densidad, (%)	<b>6,0</b>				
Asfalto para 4% de Huecos de Aire, (%)	<b>5,8</b>				
Contenido óptimo de Asfalto, (%)	<b>5,9</b>				
<b>V. DOSIFICACIÓN RECOMENDADA</b>					
	Resultado	Exigencia	Método		
		MC.V5, (Tabla 5.408.203.A y B)			
Contenido óptimo de Asfalto, (%)	<b>5,9 ± 0,3</b>	Informar	8.302.40 y 47		
Densidad de diseño Marshall, (kg/m <sup>3</sup> )	<b>2.378</b>	Informar	8.302.40 y 48		
Estabilidad, (Newton)	<b>15.150</b>	Mín. 9.000	8.302.40 y 49		
Fluencia, (0,25mm)	<b>12,5</b>	Mín. 8 - Máx. 16	8.302.40 y 50		
Huecos de Aire, Va, (%)	<b>3,4</b>	Mín. 3 / Máx. 5	8.302.40 y 51		
Vacios en el agregado, VAM, (%)	<b>14,5</b>	Mín. 14	8.302.40 y 52		
Temperatura de Mezclado, (°C)	<b>156,7</b>	Informar	8.302.40 y 53		
Temperatura de Compactación, (°C)	<b>147,0</b>	Informar	8.302.40 y 54		



N° Informe: CLASA UdeC MAC  
29-02-2024  
Página: 4

#### VI. RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (TSR)

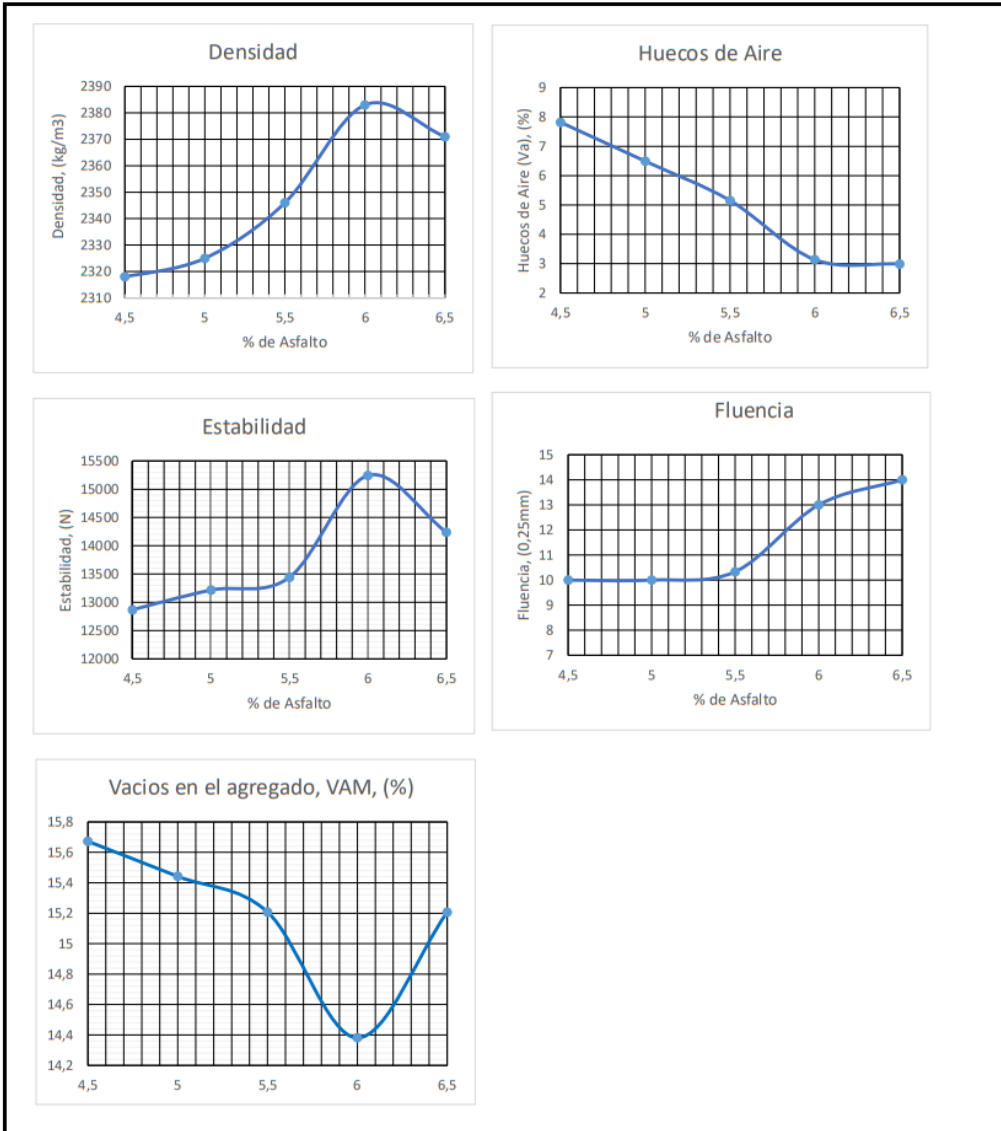
	Condición Húmeda	Condición Seca	Exigencia
Promedio Vacío, (%)	8,0	8,1	Mín. 6 / Máx. 8
Promedio Saturación inicial, (%)	73	-	Mín. 55 / Máx. 80
Promedio Saturación Final, (%)	78	-	Mín. 80
Promedio Resistencia a la Tracción a 25°C, (kPa)	703	1227	Informar
<b>Resistencia a la Tracción, (%)</b>	<b>57</b>		Mín. 75

LABORATORIO  
ENSAYO DE MATERIALES  
Y ASISTENCIA TÉCNICA  
CLASA S.A.

M<sup>a</sup> Elena Araneda N.  
Ingeniera Civil  
Jefe Asistencia Técnica  
CLASA S.A.



**Anexo: Gráficos de Diseño Marshall**



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO**

**Departamento** : Departamento de Ingeniería Civil  
**Carrera** : Ingeniería Civil  
**Nombre del memorista** : Domingo Ortiz Arias  
**Título de la memoria** : Análisis técnico ambiental del cemento asfáltico modificado con lignina Kraft  
**Fecha de la presentación oral** :  
  
**Profesor(es) Guía** : Daniella Escribano  
**Profesor(es) Revisor(es)** : Alex Schwarz  
**Concepto** :  
**Calificación** :

**Resumen**

Existe un crecimiento proyectado en la demanda mundial de asfalto impulsado por la construcción y mantenimiento de carreteras. El asfalto contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos. Para hacer frente a esto, se investiga el uso de materiales renovables como la lignina, como sustituto parcial del betún.

El objetivo de esta investigación fue analizar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada con lignina, así como evaluar su potencial reducción del impacto ambiental. Esto como potencial alternativa competitiva a la mezcla tradicional. Para ello, se diseñó un ligante modificado utilizando diferentes porcentajes de lignina. Posteriormente, se elaboró el diseño de mezcla asfáltica modificada y se evaluó el pavimento desde una perspectiva estructural. Finalmente se compararon con un enfoque ambiental la alternativa de pavimentación modificada con la pavimentación tradicional, utilizando el análisis de ciclo de vida para su evaluación.

Los resultados obtenidos revelaron que el ligante modificado con lignina aumentó en su viscosidad cinemática y disminuyó en la ductilidad. Se sugiere un reemplazo del 0,5% de lignina. Por otro lado, la mezcla asfáltica modificada demostró que requiere un espesor menor para proporcionar una capacidad de soporte equivalente a la mezcla tradicional. En lo que respecta al análisis de impacto ambiental, se observó una reducción del 0,8% en las emisiones de gases de efecto invernadero y un 5% en promedio en las categorías de impacto ambiental.