

JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO

**Premio internacional
A LA INNOVACIÓN EN CARRETERAS**

FINALISTA- Texto completo

Fityre: Desarrollo de un aditivo en base a fibra textil de neumáticos fuera de uso (FTNFU) para mezclas asfálticas durables y sostenibles.

Autores:

Gonzalo Alfonso Valdés, Alejandra Tatiana Calabi, Carla Alejandra Duarte, Cristian Andrés Mignolet, Leonardo Andrés Sierra, Aner Martínez y Cristián Eduardo Díaz. Universidad de La Frontera y del Grupo Bitumix (Chile).

FITYRE: DESARROLLO DE UN ADITIVO EN BASE A FIBRA TEXTIL DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (FTNFU) PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DURABLES Y SOSTENIBLES

RESUMEN

En el presente documento se muestran los resultados obtenidos de una innovación realizada en Chile entre la academia y la industria para desarrollar un aditivo en base a fibra textil de neumático fuera de uso (FTNFU) que permite aumentar la durabilidad y mejorar la sostenibilidad de las mezclas asfálticas (Fityre es el nombre de fantasía del aditivo). Este aditivo se ha desarrollado en dos formatos: Fityre tipo 1 – para su uso en mezclas convencionales (HMA) y Fityre tipo 2 – para su uso en mezclas especiales Stone Mastic Asphalt (SMA). En el caso del desarrollo de Fityre tipo 1 para mezclas tipo HMA, el objetivo fue mejorar las propiedades de desempeño de este material, lo que permite extender la durabilidad de los pavimentos asfálticos, retardando las actividades de mantención y rehabilitación. En el caso del desarrollo de Fityre tipo 2, el objetivo fue reemplazar los pellets de celulosa que actualmente se requieren para la fabricación de las mezclas SMA. Este proyecto constó de seis etapas: en la primera, se caracterizó la FTNFU obtenida del proceso de reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU), identificando que la composición principal de la fibra era poliéster, y se definió un procedimiento de fabricación manual del aditivo Fityre en formato granular, tipo pellet. En la segunda etapa se evaluaron tres contenidos de aditivo (2%, 5% y 8% en peso de ligante) en mezclas asfálticas tipo HMA y se evaluaron diferentes propiedades de desempeño, donde destacan los resultados obtenidos en resistencia al ahuellamiento, módulo de rigidez y daño por humedad en las mezclas con 2% y 5% de aditivo Fityre tipo 1. En la tercera etapa se analizaron las mismas propiedades de diseño y de desempeño, pero ahora en mezclas tipo SMA. Se evaluó el reemplazo de los pellets de celulosa en tasas de 50%, 75% y 100%. Los resultados indicaron que todos los porcentajes de reemplazo evaluados se comportaban, tanto en diseño como en desempeño, como la mezcla SMA de referencia. En la cuarta etapa se definió un protocolo de fabricación mecanizada de los pellets de Fityre y se desarrolló un equipo extrusor capaz de replicar las características de densidad y diámetro de los pellets producidos de manera manual, tanto el aditivo Fityre tipo 1 para mezclas HMA como el Fityre tipo 2 para mezclas tipo SMA. En la etapa 5 se evaluó la propiedad crítica de fatiga, tanto en las mezclas convencionales tipo HMA como en las mezclas tipo SMA, comparando los resultados obtenidos con la adición del aditivo Fityre fabricado de manera manual con aquél elaborado de manera mecánica. Los resultados indican que la incorporación del aditivo Fityre tipo 1 en las mezclas convencionales tipo HMA y Fityre tipo 2 en mezclas especiales tipo SMA otorgan una mayor resistencia al daño por fatiga, duplicando su vida a fatiga. Finalmente, en la etapa 6 se desarrollaron análisis de los impactos ambientales y sociales asociados al uso del aditivo Fityre en sus dos formatos. El análisis de ciclo de vida evidencia que el aditivo desarrollado genera menor impacto ambiental, especialmente en las categorías cambio climático y acidificación de suelos, agotamiento de recursos fósiles y toxicidad humana, comparado con el uso de otras fibras comerciales. En cuanto a la contribución a la sostenibilidad social, el uso de Fityre en sus dos formatos impactan positivamente en la mayoría de los criterios sociales evaluados; entre los que destacan “Interés de los consumidores”, la “Innovación y desarrollo”, “Ampliación de la vida útil” y la “Transferencia del conocimiento”.

INTRODUCCIÓN

Alrededor del mundo cada año se generan cerca de 1.500 millones de neumáticos fuera de uso (NFU) [1], representando casi 20,6 millones de toneladas métricas en el año 2018 [2]. En Latinoamérica, la mayoría de los NFU son dispuestos en rellenos sanitarios o en sitios ilegales, causando problemas ambientales y sanitarios. Debido a su composición compleja, los neumáticos son difíciles de reciclar y el uso de sus materiales requiere diferentes procesos de separación basados en reducción de tamaño [2,3]. Los principales materiales recuperados del reciclaje de neumáticos son caucho (granulado o polvo), cordones de acero y fibras textiles, representando el 70%, 5-30% y 5-15% en peso, respectivamente [4–6]. El caucho de neumático puede ser aplicado en mezclas asfálticas en caliente porque contribuye a mejorar el desempeño para reducción de ruidos, resistencia al envejecimiento, estabilidad a altas temperaturas y resistencia a la fatiga [7]; y el acero recuperado puede ser aplicado como aditivo para refuerzo en cementos o ser reutilizado como acero reprocesado [5]. No obstante, las fibras recuperadas de los NFU son difíciles de usar directamente en cualquier aplicación, porque se encuentran contaminadas con partículas de caucho (entre 15-60% en peso) [4,6,8,9] y se requiere obligatoriamente un proceso de limpieza. Adicionalmente, su baja densidad hacen que su transporte sea costoso [10]. Por lo tanto, estas fibras textiles son enviadas comúnmente a rellenos sanitarios o incineradores [5,11]. Sólo hace pocos años, algunos estudios se han enfocado en el reciclaje de las fibras textiles de neumáticos fuera de uso (FTNFU) aplicadas en distintas áreas, como la ingeniería de pavimentos, refuerzo de suelos, construcción de barreras a la humedad en rellenos sanitarios, productos para absorber sonidos, refuerzo en compuestos de plástico, compuestos de bajo costo para absorber solventes orgánicos en suelos tratados con cemento, pasto sintético, suelas de zapatos y ropa [5,12].

Las fibras textiles usados comúnmente en la fabricación de neumáticos son poliéster, poliamidas (nylon 6 o nylon 6,6) y rayón (seda artificial) [5,11]. Estas fibras poliméricas, en conjunto con el acero, son la base para proveer la resistencia a la tracción en los neumáticos [4]. Así, el contenido de fibra es importante en los vehículos livianos y el de acero en los neumáticos de maquinaria pesada. Esta característica hace a las FTNFU adecuadas para el refuerzo de diferentes matrices, como el cemento o las mezclas asfálticas.

En las mezclas asfálticas en caliente (HMA por sus siglas en inglés), diferentes tipos de fibra se usan para varios propósitos. Principalmente, la celulosa y fibras minerales son usadas en mezclas asfálticas porosas y tipo Stone Mastic Asphalt (SMA) para evitar que el ligante se drene [5]. La Tabla 1 muestra algunos estudios que prueban diferentes fibras aplicadas como aditivos en mezclas asfálticas. Considerando el nylon y las fibras de poliéster de la Tabla 1, se observa que estos materiales muestran buenos resultados en estabilidad Marshall, resistencia a la deformación permanente y al comportamiento de fatiga, lo cual indicaría que aditivos de FTNFU fabricados con esos materiales podrían tener los mismos resultados. Más aún, los autores Bocci y Prosperi (2020) y Landi y colaboradores (2018) demostraron que las FTNFU muestran aumentar la resistencia a la fatiga y, adicionalmente, mejorar la resistencia a la tracción indirecta [5,10].

En este contexto, este estudio buscó desarrollar un aditivo fabricado a partir de FTNFU y ser aplicado a HMA convencionales y a mezclas tipo SMA para mejorar sus propiedades de desempeño. Las etapas desarrolladas en este estudio (Figura 1) se describen en el desarrollo de este documento.

Tabla 1. Estudio bibliográfico referente al análisis de diferentes porcentajes de fibra añadida en mezclas asfálticas.

FIBRA	ESTUDIO	DENSIDAD; LONGITUD; DIÁMETRO	CANTIDAD AÑADIDA		VENTAJAS	DESVENTAJAS
			(en peso del ligante)	(en vol. del ligante)		
ACERO	[13]	p: 7,180 g/cm ³ L: 2 - 8 mm Ø: 0,157 mm	2 % 4 % 6 % 8 %	0,3 % 0,6 % 0,8 % 1,1 %	Presentan una buena distribución en la mezcla	Susceptibles al impacto de los agregados durante el proceso de mezclado y compactación. Esto se debe a que son fibras gruesas y de longitud media.
	[14]	p: 7,85 g/cm ³ L: 4 - 12 mm Ø: 0,18-0,3 mm	0,5 % 1 % 2 %	0,06 % 0,1 % 0,3 %	<ul style="list-style-type: none"> Presentan una buena distribución en la mezcla, formando una red tridimensional. Aumento en la resistencia a la tracción indirecta. 	Menor resistencia a fatiga con un contenido de 2%.
POLIPROPILENO	[15]	p: 0,91 g/cm ³ L: 12 mm	5 % 7,5 % (óp.) 10 %	5,5 % 8 % 11 %	<ul style="list-style-type: none"> Aumento en la densidad aparente de las mezclas asfálticas. Aumento en la estabilidad Marshall de las mezclas. 	
	[16]	p: 0,91 g/cm ³ L: 3 - 50 mm	5,5 % 9 % 18 % (óp.)	6 % 10 % 20 %	<ul style="list-style-type: none"> Aumento en la estabilidad Marshall de las mezclas. Mejora en las propiedades de deformación permanente y resistencia a fatiga. 	Las fibras presentan una densidad específica y una distribución de tamaño diferente, que pueden causar diferencias en el comportamiento de las mezclas.
	[17]	p: 0,91 g/cm ³ L: 6 mm Ø: 40 µm	9% (óp) 18 %	10 % 20 %	Mejora en la estabilidad Marshall, la resistencia a la tracción indirecta y la susceptibilidad a la humedad (TSR)	<ul style="list-style-type: none"> Gran parte de las fibras se disuelven durante el proceso de modificación debido a su bajo punto de fusión. Sobre el 9% de fibra se ven afectadas las propiedades mecánicas de la mezcla, exceptuando la deformación permanente y tenacidad.
NYLON	[17]	p: 1,14 g/cm ³ L: 12 mm Ø: 23 µm	9 % 18 % (óp)	8 % 16 %	Mejora en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica: estabilidad Marshall, resistencia a la tracción indirecta (TSR) de deformación permanente y rendimiento a la flexión.	
	[18]	p: 1,4 g/cm ³ L: 12 mm Ø: 20 µm	2 % 4 % 6 % 8 % (óp)	0,7 % 1,4 % 2,1 % 2,9 %	<ul style="list-style-type: none"> Aumento en la estabilidad Marshall. Mejora en la resistencia a la deformación permanente. Mejora en la resistencia a la fisuración por fatiga. 	
CELULOSA	[14]	p: 1,50 g/cm ³ L: 0,02 - 2,5 mm Ø: 0,025 mm	0,5 % 1 % 2 %	0,3 % 0,7 % 1,3 %	<ul style="list-style-type: none"> Aumento en la resistencia a la tracción indirecta. Alta resistencia al daño por humedad. Mejora en la resistencia a la fisuración a baja temperatura 	
VIDRIO	[14]	p: 2,58 g/cm ³ L: 6 - 13 mm Ø: 0,012 - 0,02 mm	0,5 % 1 % 2 %	0,2 % 0,4 % 0,8 %	<ul style="list-style-type: none"> Aumento en la resistencia a la tracción indirecta. Alta resistencia al daño por humedad. Mejora en la resistencia a la fisuración a baja temperatura 	Menor resistencia a fatiga con un contenido de 2%.
	[19]	p: 1,18 g/cm ³ L: 12 mm Ø: 0,13 mm	1 % 2 % 3 %	0,9 % 1,7 % 2,5 %	<ul style="list-style-type: none"> Mejora en la resistencia a la fisuración con un contenido de 1% y 2%. El efecto positivo de las fibras compensa el impacto adverso del material RAP. 	Sobre un 2% se ve afectada la resistencia a la fisuración de las mezclas. Sin embargo, se mantiene un mejor comportamiento con respecto a la mezcla de control.
ARAMIDA	[20]	p: 1,44 g/cm ³ L: 6 mm	1 %	0,7 %	La fibra influye positivamente en la resistencia a la abrasión	<ul style="list-style-type: none"> Disminución en el contenido de huecos de aire. Menor resistencia a la tracción indirecta (ITS). Aumento de la susceptibilidad a la humedad.
	[21]	p: 1,44 g/cm ³ L: 1 - 6 mm Ø: 12 µm	1 % 2 % 3 % 4 %	0,7 % 1,4 % 2,1 % 2,8 %	<ul style="list-style-type: none"> Mejora en el rendimiento a altas temperaturas. Mejora en la viscosidad del CA modificado, lo que resulta en un aumento del módulo de rigidez. 	<ul style="list-style-type: none"> Aglomeración de las fibras con una longitud de 6 mm. Las fibras no proporcionan un efecto prometedor en la resistencia a la fisuración a baja temperatura.
BASALTO	[22]	p: 2,65 g/cm ³ L: 9 mm Ø: 13 - 15 µm	4 % 6 % (óp) 8 % (óp) 10 %	1,5 % 2,3 % 3 % 13,8 %	<ul style="list-style-type: none"> Buen comportamiento a temperaturas bajas. Las fibras forman una estructura en forma de red, lo cual permite una mejora en la integridad, dispersa la tensión y retrasa la extensión de microfisuras. 	La dispersión de la fibra no es uniforme a contenidos altos.
	[23]	p: 2,63 g/cm ³ L: 24 mm Ø: 18 µm	5 %	1,9 %	<ul style="list-style-type: none"> Las fibras presentan una eficacia considerable a la hora de mejorar las propiedades de las mezclas a bajas temperaturas Las fibras propician un efecto positivo en el comportamiento por fatiga. 	Las fibras por sí solas no son efectivas para mejorar la vida útil de la mezcla en comparación a la mezcla de control.
POLIÉSTER	[24]	p: 1,35 g/cm ³ L: 10 - 20 mm Ø: 30 µm	0,5 % 1 % (óp) 1,5 % 2 %	0,4 % 0,7 % 1,1 % 1,5 %	Mejora en la resistencia a fatiga.	Debido a la aglomeración que se genera en la mezcla, la cantidad máxima de contenido de fibra se restringe al 2%.

	[17]	p: 0,40 g/cm ³ L: 6 mm Ø: 41 µm	9% 18 % (óp)	22,5 % 45 %	Mejora en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica: estabilidad Marshall, resistencia a la tracción indirecta (TSR) de deformación permanente y rendimiento a la flexión.	
	[25]	p: 1,4 g/cm ³ L: 12 mm Ø: 20 µm	5% 6 % 7% (óp) 8 % 9 %	3,6 % 4,3 % 5 % 5,7 % 6,4 %	Mejora en la resistencia a la fisuración a baja temperatura.	<ul style="list-style-type: none"> Sobre un 7% se ve afectada la distribución de la fibra en la mezcla.
	[26]	p: 1,38 g/cm ³ L: 4 - 24 mm Ø: 20 µm	1 % 4 % (óp) 8 %	0,7 % 3 % 6 %	<ul style="list-style-type: none"> Mejora las propiedades de deformación por tracción. Mantiene la ductilidad a la tracción, independiente del cambio de temperatura (temperaturas bajas). 	<ul style="list-style-type: none"> Un contenido inferior al 1% y superior al 8% de fibra genera un efecto desfavorable en el rendimiento de tracción. La longitud de fibra es crucial para obtener un buen comportamiento y distribución en la mezcla. Longitud óptima 6 mm.
NFU	[5]	p: 0,23 g/cm ³ L: 1 - 2,5 mm Ø: 5 - 40 µm	6 %	26,1 %	<ul style="list-style-type: none"> Mejora en la resistencia a la fatiga. Mantiene el módulo de rigidez a temperaturas bajas/ intermedias, con respecto a la mezcla de control. Después de la falla, las fibras generan un efecto de sellado de los bordes de las grietas y contrastan la fractura. 	<ul style="list-style-type: none"> La presencia de fibras de NFU reduce la compactabilidad de la mezcla. Por tanto, se recomienda aumentar el contenido de relleno alrededor del 2% en peso.
	[10]	p: 0,17 g/cm ³ Ø: 22,5 µm	2 % 4 % 6 % (óp) 10 %	17,4 % 34,8 % 52,2 % 87 %	<ul style="list-style-type: none"> Aumento del contenido de huecos. Aumento en la resistencia a la tracción indirecta (ITS). Su uso es un escenario prometedor para reducir el impacto ambiental. La alta rentabilidad económica hace que este sistema de reciclaje sea económicamente sostenible. 	



Figura 1. Esquema de las etapas desarrolladas en el proyecto.

DESARROLLO

ETAPA 1: INVESTIGAR Y DESARROLLAR UN ADITIVO GRANULADO A PARTIR DE FTNFU PARA SU USO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Para realizar la formulación del aditivo en base a FTNFU, primero se identificó el proceso desde donde se obtienen las fibras a utilizar, luego se realizó la caracterización de los materiales componentes del aditivo, analizando aspectos físico-químicos de los diferentes materiales utilizados. Por último, se determinó la formulación y el procedimiento de fabricación manual del aditivo granulado a nivel de laboratorio, con la finalidad de obtener un producto homogéneo y replicable.

➤ OBTENCIÓN DE LA FTNFU

La FTNFU utilizada es un subproducto del proceso de reciclaje de neumáticos fuera de uso realizado por Polambiente S.A. Esta empresa produce gránulos, polvo y chips de caucho reciclado, procesando anualmente alrededor de un millón de NFU, donde el 60% corresponde a neumáticos de vehículos livianos y el 40% a neumáticos de vehículos pesados. La empresa informa que del total de peso de material reciclado un 66% es caucho (gránulos, polvo, chips), un 26.5% es acero y un 7.5% es fibra textil, aproximadamente. La fibra se obtiene en dos formatos, uno que contiene gránulos de caucho entremedio de las fibras, y otro que contiene polvo de caucho entre las fibras. La fibra con gránulos de caucho representa más del 90% del volumen de fibra generada, por lo que se escoge esta fibra para fabricar el aditivo.

➤ CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

El aditivo granular se fabricó utilizando la FTNFU con gránulos de caucho, una emulsión asfáltica catiónica tipo CRS-2, y polvo de caucho como agente anti-aglomerante. A continuación, se detallan los análisis físicoquímicos para caracterizar los materiales utilizados.

Fibra textil de NFU

La FTNFU corresponde a un material sintético y, de acuerdo con la literatura, se compone en su mayoría por fibras de poliéster y poliamidas [27]. Tanto el poliéster como las poliamidas son polímeros termoplásticos de alta resistencia. Las poliamidas utilizadas en las fibras de los neumáticos son del tipo Nylon 6 y Nylon 6,6 [28]. Si bien ambos polímeros son lineales derivados de hidrocarburos, sus principales diferencias radican en la presencia de un grupo aromático en los poliésteres y de grupos amida (que contienen nitrógeno) en las poliamidas. La densidad de la fibra es de 0,18 gr/cm³ aproximadamente y su diámetro ronda los 22,5 μm [10].

Se realizaron análisis a través de microscopía diferencial de barrido y espectroscopía con energía dispersiva de Rayos X (SEM-EDX), utilizando un microscopio electrónico de presión variable con un módulo de transmisión STEM SU-3500 (Hitachi, Japón) y un detector de energía dispersiva de rayos X (EDX) QUANTAX 100 (Bruker, Alemania). En la Figura 2 se observa que la composición de las fibras de una muestra es principalmente carbono (83.2%) y oxígeno (12.6%). La ausencia de nitrógeno en esta muestra indicaría que las fibras se compondrían de poliéster principalmente y no de poliamidas, lo

que concuerda con aquello declarado por la empresa proveedora de fibra. Por otro lado, la presencia de azufre (1.9%) se encuentra distribuida uniformemente en la muestra analizada, lo que indicaría que residuos de caucho estarían presentes en toda la fibra. Además, la presencia de silicio (1.1%) si bien representa un porcentaje menor de la composición, ésta se encuentra concentrada principalmente en las áreas donde se encuentran gránulos de caucho de mayor tamaño. El análisis también detectó la presencia de hierro (1.0%) y sodio (0.2%) en cual estaría contenido en los residuos de caucho que permanecen en la fibra.

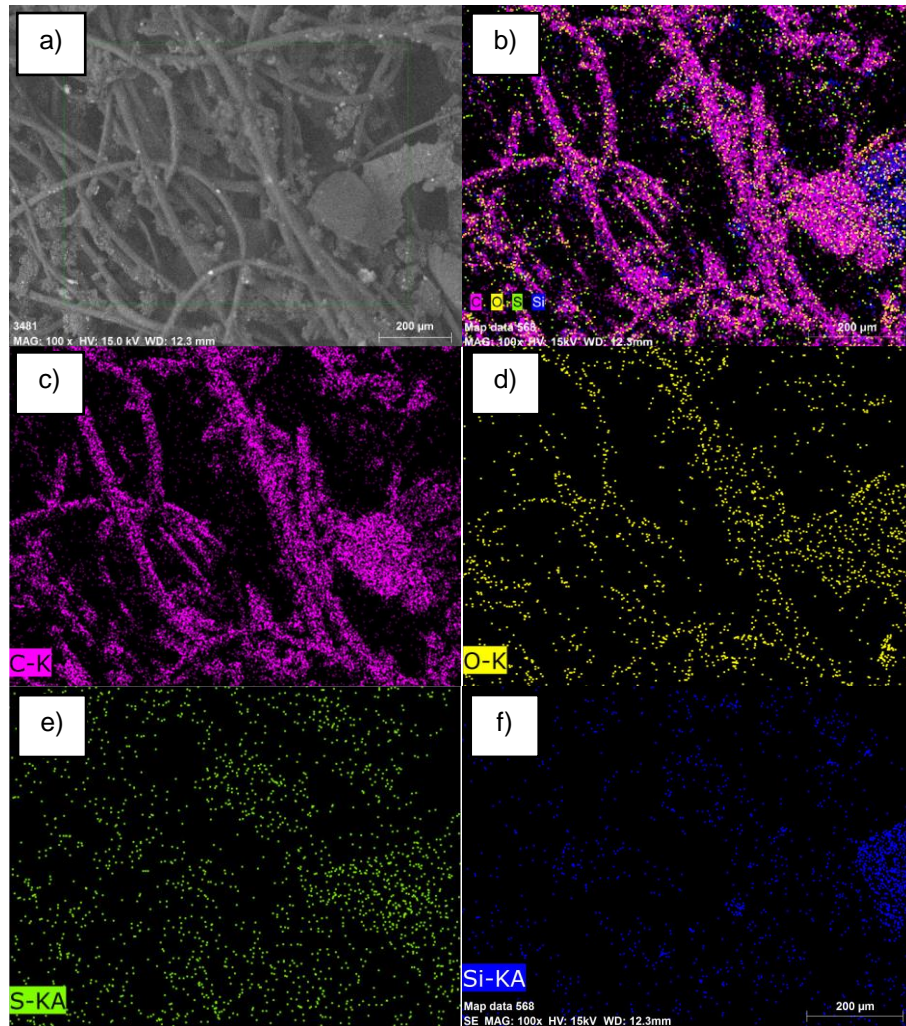


Figura 2. Análisis elemental semicuantitativo de la FTNFU. (a) Micrografía original, (b) distribución de elementos químicos en la micrografía analizada, (c) contenido de carbono, (d) contenido de oxígeno, (e) contenido de azufre y (f) contenido de silicio.

A través del ensayo de análisis termogravimétrico (TGA) se registró la pérdida de la masa de una muestra de FTNFU en la medida en que se incrementa la temperatura, bajo condiciones controladas de velocidad de calentamiento y diferentes atmósferas de reacción, obteniendo de esta manera la curva termogravimétrica TGA/DSC por medio del equipo STA6000, Perkin Elmer. En la Figura 3.a se muestran los resultados obtenidos del análisis termogravimétrico de la FTNFU, en donde se puede observar que presenta su etapa de descomposición térmica en el rango de temperatura de 300°C - 500°C. Además, es posible observar que las fibras presentan un punto de fusión de 241.75°C. De

acuerdo con la literatura, el punto de fusión del poliéster PET está en el rango de 241-243.8°C [29,30]. En cambio, las temperaturas reportadas para las poliamidas Nylon 6 y Nylon 6.6 son 210.6°C y 259°C, respectivamente [10,31]. Por lo tanto, el análisis termogravimétrico indicaría que la fibra es del tipo poliéster PET. Debido a que la temperatura de fusión de la Fibra 1 analizada es superior a 240°C no habría problemas de incorporarla en la preparación de las mezclas asfálticas, las cuales se realizan un rango de 140°C - 190°C, dependiendo el cemento asfáltico utilizado.

Para complementar la caracterización de la FTNFU se procedió a realizar la identificación de los grupos funcionales a través de un análisis de espectrofotometría infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), equipo Perkin Elmer Modelo Spectrum Two con accesorios dedicados al estudio de polímeros, con sistema ATR (Reflectancia Total Atenuada). La Figura 3.b muestra los resultados, indicando evidentes señales en las bandas 1711; 1244,14 y 871,4 cm^{-1} , las cuales corresponden a los grupos $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}(\text{O})-\text{O}$ grupo tereftalato y anillos aromáticos, respectivamente. Estas señales son características del poliéster PET. Estos resultados coinciden con aquellos reportados por Bocci & Prospero (2020) [5], quienes afirman que su muestra de FTNFU analizada por FTIR corresponde en un 99,5% a poliéster. Además, las señales 1536,21 y 1092,18 cm^{-1} indican la presencia de óxido de silicio, el cual es uno de los componentes principales del caucho. Esto se debe a la presencia de gránulos de caucho presentes en la fibra.

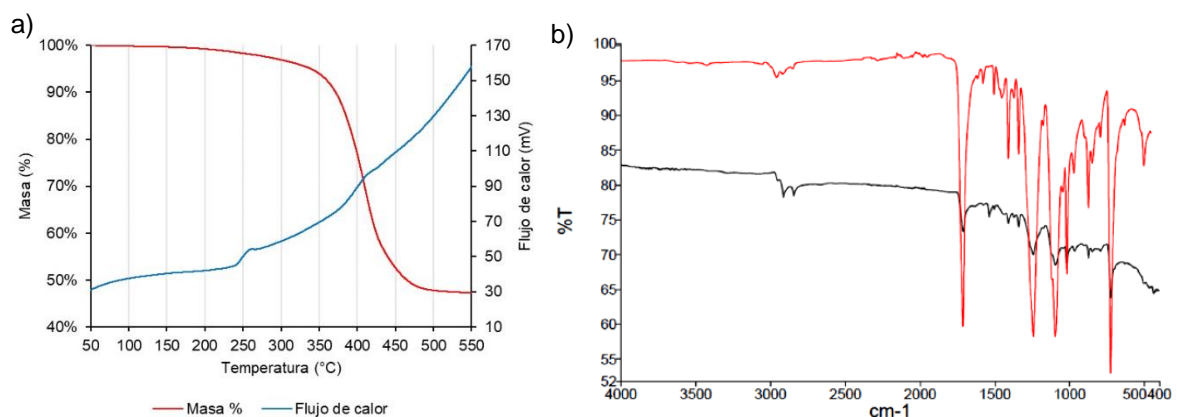


Figura 3. (a) Pérdida de masa y flujo de calor de la FTNFU. (b) Análisis FTIR en FTNFU comparada con patrón de poliéster PET.

Emulsión asfáltica

Para la fabricación de los aditivos granulados de FtNFU, se utilizó una emulsión asfáltica catiónica tipo CRS-2, que cumple con las especificaciones señaladas en el apartado 8.301.5 del Manual de Carretas. La emulsión asfáltica seleccionada corresponde a una emulsión catiónica de quiebre rápido, con un 65% de cemento asfáltico (CA). Este CA posee un grado de penetración mayor a 90 dmm a 25°C. Además, la emulsión asfáltica es de color café oscuro y se encuentra compuesta a base de cemento asfáltico, agua, emulsificantes y aditivos. Es una emulsión versátil, que no contamina, con buena compatibilidad y adherencia a los áridos, utilizada principalmente para la aplicación de sellos y tratamientos superficiales simples o dobles. Su densidad es variable según su temperatura, pero para

efectos prácticos se puede considerar igual a 1 kg/lt. Las características de la emulsión asfáltica de acuerdo con el proveedor se muestran en la Tabla 2. Cabe descartar que todos los valores informados cumplen con la normativa especificada en el apartado 8.302 del Manual de Carreteras.

Tabla 2. Caracterización de emulsión asfáltica CRS-2.

ENSAYOS	RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN	NORMA
Viscosidad saybolt furol a 50°C, (sfs)	177	Min. 100 – Máx. 400	MC 8.302.12
Estabilidad al almacenamiento, 1 día, (%)	0	Máx. 1	MC 8.302.5
Carga de partículas	Positivo	Positiva	MC 8.302.5
Demulsibilidad (dioctil sulfo de na), (%)	50	Min. 40	MC 8.302.5
Ensayo de tamizado, (%)	0,03	Máx. 0,10	MC 8.302.5
Densidad a 25°C, (g/ml)	1,008	Informar	ASTD D1298
Destilación			
Aceite, (%)	1	Máx. 3.0	MC 8.302.5
Residuo, (%)	70	Min. 65	MC 8.302.5
ANÁLISIS DEL RESIDUO			
Penetración a 25°C, 100g, 5s, (0.1mm)	110	Min. 100 – Máx. 250	MC 8.302.3
Ductilidad de residuo a 25°C, 5cm/min, (cm)	55	Min. 40	MC 8.302.8
Solubilidad en tricloroetileno, (%)	99,8	Min. 97,5	MC 8.302.11
Ensayo de la mancha hep./xilol, (% xilol)	<30	Máx. 30	MC 8.302.7

Polvo de caucho

El polvo de caucho utilizado proviene del polvo fino del proceso de trituración de los NFU realizado en la empresa Polambiente S.A. Mediante diferentes etapas de reducción de tamaño el caucho es pulverizado a un tamaño menor a 0,18 mm, eliminado prácticamente todo el material de acero y fibra textil. Este material se incorpora en la fase de fabricación del aditivo granular como estabilizador antiadherente, para evitar una posible aglomeración entre los gránulos del aditivo.

➤ PROCEDIMIENTO MANUAL DE FABRICACIÓN DE ADITIVO GRANULAR

El procedimiento manual de fabricación del aditivo en base a FTNFU fue el siguiente: Primero, se preparan en distintos recipientes las FTNFU, la emulsión asfáltica (CRS-2) y agua, en una relación en peso 1:1:1. Luego, se diluye la emulsión asfáltica en el agua en una relación en peso de 1:1. Por otro lado, las FTNFU se someten a un procedimiento de separación para aumentar su volumen y así, posteriormente, facilitar la absorción del agua y la emulsión asfáltica en el procedimiento de mezclado. Después, la emulsión diluida en agua se adiciona a las FtNFU y se comienza con el procedimiento de mezclado. Este procedimiento se realiza de manera constante, hasta conseguir una completa distribución de la emulsión asfáltica entre las FTNFU. Una vez realizado el proceso de mezclado de la emulsión asfáltica y las FtNFU, la masa resultante se somete a un proceso de secado por un periodo mínimo de 48 horas a temperatura ambiente (20°C). Durante ese período se lleva a cabo el quiebre de la emulsión asfáltica y la posterior evaporación del agua contenida en la emulsión asfáltica diluida. Una vez seca, la masa de fibra recubierta de emulsión asfáltica se somete a un proceso de compresión y moldeado manual con la finalidad de densificarlo y darle una forma predeterminada, obteniendo así un aditivo granulado en forma de cilindro. El aditivo granular para utilizar en las mezclas asfálticas

convencionales (Fityre tipo 1) se confecciona de 6 mm de diámetro y para las mezclas asfálticas de tipo SMA (Fityre tipo 2) los cilindros se moldean con una compresión mayor para generar pellets de mayor densidad, con un diámetro aproximado de 4 mm. Posteriormente, los cilindros de masa seca de fibra y emulsión asfáltica son sometidos a un proceso de corte manual con tijeras, obteniendo el aditivo en forma de gránulos. Para ambos tipos de mezcla asfáltica se cortan los cilindros de tamaños entre 6 y 8 mm de largo. Luego, los gránulos de aditivo son mezclados con polvo de caucho en una proporción en peso 20:1 (pellet - caucho fino), con el fin de evitar la adherencia entre los gránulos. Finalmente, los gránulos de aditivo son almacenados para su posterior utilización en bolsas o en cajas plásticas.

La formulación final para el aditivo granular fabricado es en peso 57,7% de FTNFU, 37,5% de cemento asfáltico y 4,8% de polvo de caucho. La densidad aparente del aditivo granular elaborado para las mezclas asfálticas convencionales (Fityre tipo 1) fue de 0.15 g/cm³ y para las mezclas asfálticas tipo SMA (Fityre tipo 2) fue de 0.24 g/cm³, Figura 4.

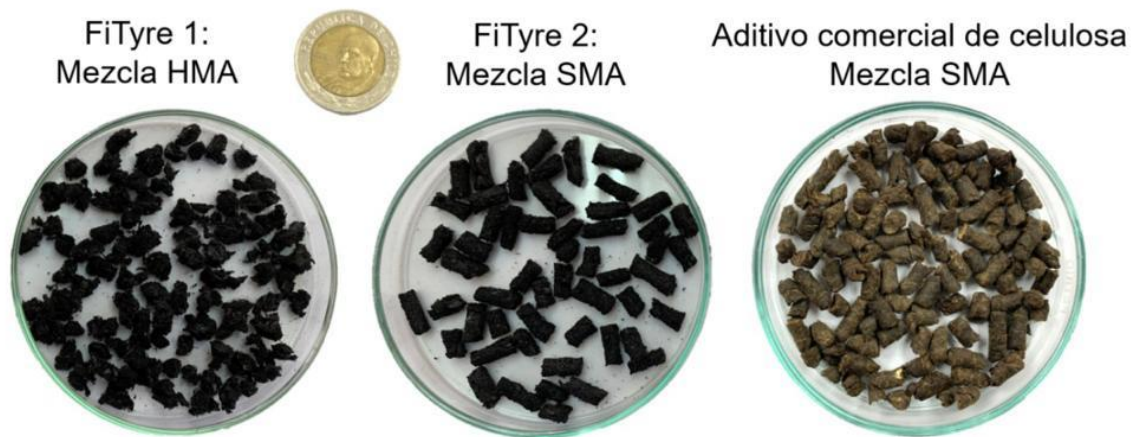


Figura 4. Imagen comparativa de los dos formatos del aditivo desarrollado para su uso en mezclas HMA y SMA.

ETAPA 2: EVALUAR LAS PROPIEDADES DE DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL CON DIFERENTES CONTENIDOS DE ADITIVO GRANULADO DE FTNFU PARA DETERMINAR EL ÓPTIMO DE ADICIÓN.

El objetivo de esta etapa fue determinar y verificar las propiedades de los materiales que compondrán la mezcla asfáltica convencional de referencia (MCR), la granulometría del diseño de la mezcla de referencia y el contenido de cemento asfáltico óptimo, de acuerdo con lo exigido en la normativa chilena. Además, se buscó determinar tres porcentajes de adición de aditivo granular de FTNFU, en función del cumplimiento de las especificaciones Marshall. Esto con la finalidad de evaluar las propiedades de desempeño, tanto a la MCR como a las mezclas con aditivo granular de FTNFU. En este ámbito, se evaluó la resistencia a la fisuración térmica, al daño por humedad y a la deformación permanente.

➤ DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL DE REFERENCIA

El ligante asfáltico utilizado en este estudio corresponde a un ligante convencional CA-24 clasificado de acuerdo con la normativa chilena. Los agregados eran de origen fluvial y se componían de partículas de dolomita, basalto, dacitas, andesitas, riolitas, areniscas, cuarzo y cuarcita. Las propiedades del ligante asfáltico y los agregados utilizados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades del ligante asfáltico y de los agregados utilizados en este proyecto.

Propiedades	Resultados	Especificaciones [32]
LIGANTE ASFÁLTICO CA-24		
Viscosidad absoluta a 60 °C, 300 mm Hg (p)	3072	Mín. 2400
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s (0.1 mm)	58	Mín. 40
Ductilidad a 25 °C (cm)	>150	Mín. 100
Punto de ablandamiento r y b (°C)	51.4	Por ser reportado
AGREGADO GRUESO		
Gravedad específica (kg/m ³)	2685	-
Absorción (%)	1,54	-
Pérdida de abrasión Los Ángeles (%)	20	Máx. 25–35
Agregados chancados (%)	96	Mín. 90–70
AGREGADO FINO		
Gravedad específica (kg/m ³)	2650	-
Absorción (%)	1,1	<3
AGREGADO COMBINADO		
Sales solubles (%)	0	Máx. 2–3
Arena equivalente (%)	70	Min. 50–40

Se diseñó una mezcla asfáltica densa tipo IV-12 según especificaciones chilenas como mezcla de referencia (HMA/R) en el estudio. El diseño del HMA/R y la determinación del contenido óptimo de asfalto (COA) se llevó a cabo utilizando el Método de Diseño Marshall, cumpliendo las especificaciones chilenas. Se obtuvo una COA de 5,3% para la HMA/R y cumplió con los requisitos de estabilidad (kN), flujo (0,25 mm), vacíos de aire (porcentaje) y vacíos en agregado mineral (porcentaje).

➤ SELECCIÓN DE TRES PORCENTAJES DE ADITIVO A EVALUAR

La selección de los porcentajes de adición del aditivo desarrollado a evaluar en la mezcla asfáltica se realizó con base en el análisis realizado en la revisión bibliográfica que se muestra en la Tabla 1. En este análisis se determinó el contenido óptimo de adición de diferentes tipos de fibras de acuerdo con su efecto sobre importantes propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. Los resultados obtenidos de aquellos estudios que evaluaron polímeros termoplásticos como el poliéster (polietileno tereftalato: PET) y poliamidas (nylon), se priorizaron. Por lo tanto, para este estudio experimental se definieron las adiciones de 2%, 5% y 8% (en peso de ligante asfáltico) del aditivo WTTF. Además, se verificaron las propiedades de diseño para cada porcentaje de adición seleccionado, cumpliendo con las especificaciones chilenas, como se muestra en la Tabla 4. En la fabricación de todas las mezclas asfálticas evaluadas se utilizó un COA de 5,3%.

Tabla 4. Propiedades de diseño de mezcla asfáltica de referencia y con distintos porcentajes de adición de aditivo en base a FTNFU.

Tipo de mezcla	Temperatura de fabricación (°C)	Contenido total de ligante (% por peso de agregado)	Aditivo FTNFU (% por peso de ligante)	Densidad (kg/m ³)	Estabilidad (N)	Fluencia 0,25 mm	Vacios de aire (%)	VMA (%)
HMA/R	154	5,30	0	2418	13.745	10,8	3,1	13,9
HMA/2	154	5,30	2	2408	13.471	10,9	3,4	14,2
HMA/5	154	5,30	5	2411	14.414	11,5	3,3	14,1
HMA/8	154	5,30	8	2415	13.947	10,6	3,2	14,0
ESPECIFICACIONES CHILENAS [33,34]			CURSO DE SUPERFICIE		>9000	8-14	3-5	>13

➤ MÉTODOS DE TESTEO Y RESULTADOS

Las propiedades mecánicas o de desempeño evaluadas en las mezclas realizadas fueron módulo de rigidez, sensibilidad a la humedad, deformación permanente y resistencia a la fisuración.

Módulo de rigidez

El módulo de rigidez (SM por sus siglas en inglés) de las probetas se determinó mediante el ensayo de resistencia a la tracción indirecta de acuerdo con la norma europea UNE-EN 12697-26 (Anexo C). Esta metodología consiste en aplicar un pulso sinusoidal de carga y periodo de reposo para producir una deformación horizontal controlada en probetas cilíndricas. Cada prueba consistió en 15 ciclos de carga, aplicando una carga de compresión vertical durante 0,124 ms. Para el cálculo del módulo de rigidez se utilizaron únicamente ciclos de 10 a 15, ya que el anterior se considera como condicionamiento de la probeta. Se fabricaron cinco probetas cilíndricas por tipo de mezcla asfáltica evaluada, con un total de 20 probetas ensayadas, y se analizó un resultado promedio para cada tipo de mezcla asfáltica. Los especímenes se mantuvieron a 20 °C durante 24 h antes de la prueba.

Los resultados medios para el módulo de rigidez a 20 °C y para las densidades de las mezclas evaluadas se muestran en la Figura 5. De acuerdo con estos resultados, los valores de densidad registrados en las mezclas con diferentes porcentajes de aditivo fueron similares a los de la mezcla de referencia (HMA/R). En cuanto al módulo de rigidez, las mezclas con 2% (HMA/2) y 5% (HMA/5) de contenido de aditivo fueron superiores al valor medio del HMA/R en 13% y 10%, respectivamente. Este último cobra importancia para las mezclas asfálticas ya que mejora la capacidad estructural del pavimento [35]. La adición de 2% y 5% de contenido de aditivo permite una buena distribución de la FTNFU en la mezcla, favoreciendo su dispersión en una red tridimensional. Según estudios que aplicaron otras fibras, como fibras de acero, fibras de vidrio y otras fibras sintéticas, esta red tridimensional mejora la rigidez de la mezcla asfáltica, aumentando las fuerzas de cohesión interna [13,14,36]. Otro aspecto que puede influir en el efecto observado es la buena adherencia que se presenta entre la fibra y el ligante asfáltico, mejorando el comportamiento mecánico de la masilla asfáltica a la temperatura evaluada, tal como lo indican Calabi-Floody et al. (2019) y Chen y Lin (2005) [37,38]. Por otro lado, la mezcla con la adición del 8% de contenido de aditivo (HMA/8) registró un valor de módulo de rigidez promedio similar a la mezcla de referencia HMA. La causa de este efecto puede deberse a que el exceso de FTNFU podría provocar una mala distribución de las fibras en la mezcla.

Este resultado concuerda con lo reportado por Bocci y Prospero (2020), quienes indicaron que para 6% de adición de FTNFU no hay efecto en la propiedad del módulo de rigidez a 20 °C, obteniendo valores similares a los de la mezcla de referencia [5].

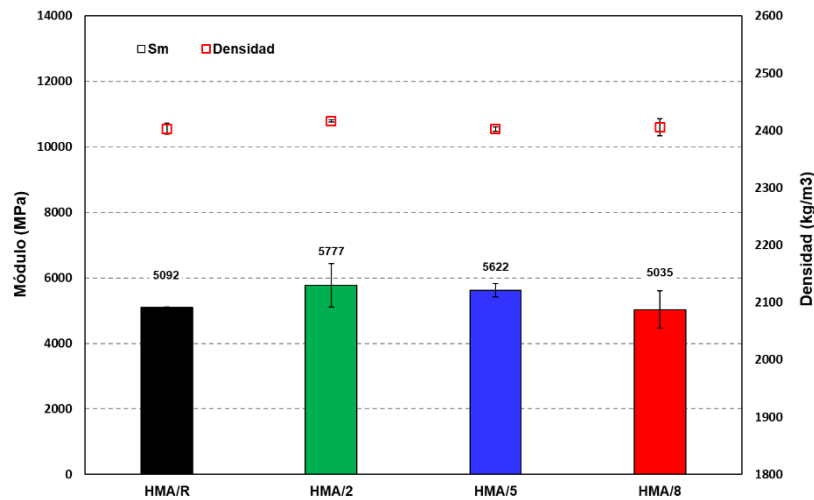


Figura 5. Módulo de rigidez a 20°C para todas las mezclas asfálticas evaluadas.

Sensibilidad al agua

La sensibilidad al agua (o daño por humedad) se analizó mediante el índice de resistencia a la tracción indirecta (ITSR por sus siglas en inglés) de acuerdo con la norma europea UNE-EN 12697-12. Este método utiliza el parámetro de resistencia a la tracción indirecta (ITS por sus siglas en inglés) de probetas secas y húmedas de acuerdo con la norma europea UNE-EN 12697-23. El procedimiento consiste en fabricar seis probetas cilíndricas por tipo de mezcla asfáltica evaluada (utilizando un compactador giratorio Superpave) y dividir las en dos subgrupos equivalentes de tres probetas de similares características físicas. Uno de estos subgrupos se utiliza para determinar el parámetro ITS medio en condiciones secas, mientras que el otro subgrupo se utiliza para determinar el parámetro ITS en condiciones húmedas. La condición seca consiste en acondicionar las probetas con aire a 20 ± 5 °C, mientras que la condición húmeda consiste en someter las probetas a saturación en agua aplicando un vacío a una presión de 6,7 kPa durante 30 ± 5 min y luego manteniéndolas sumergidas en un baño maría a 40 °C durante un periodo de 68 a 72 h. Luego, ambos subgrupos de especímenes se ensayan bajo resistencia a la tracción indirecta a 25 °C.

La Figura 6.a muestra los resultados obtenidos a partir de los valores promedio de la resistencia a la tracción indirecta de las mezclas en condiciones seca (ITSd por sus siglas en inglés) y húmeda (ITSw por sus siglas en inglés) junto con los valores de las densidades de las mezclas evaluadas. Los valores de densidad registrados en las mezclas con diferente contenido de aditivos fueron inferiores a los de HMA/R para el mismo nivel de compactación (40 giros). Esto indica que cuanto mayor sea el contenido del aditivo a base a FTNFU, mayor será la energía de compactación requerida en las mezclas. Estos

resultados son consistentes con lo descrito por el estudio realizado por Bocci y Prospero (2020) [5], quienes declaran que la presencia de FTNFU reduce la compactabilidad de la mezcla, lo que afecta directamente el contenido de vacíos de aire [39]. En relación con la resistencia a la tracción indirecta, las mezclas con adición de 2% y 5% de aditivo a base de FTNFU no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p\text{-value} > 0.05$) en los ensayos individuales ITS (seco y húmedo) en comparación con HMA/R. Sin embargo, la mezcla con la adición del 8% de aditivo a base de FTNFU registró una reducción significativa ($p\text{-valor} < 0,05$) en el valor de ITS en las condiciones ITSd e ITSw, con valores promedio de 18% y 24%, respectivamente. Este efecto podría ser causado por la reducción en la densidad del HMA/8 evaluado en relación con la HMA/R, lo que afecta la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla, como lo señalan Moreno-Navarro et al. (2014) [40].

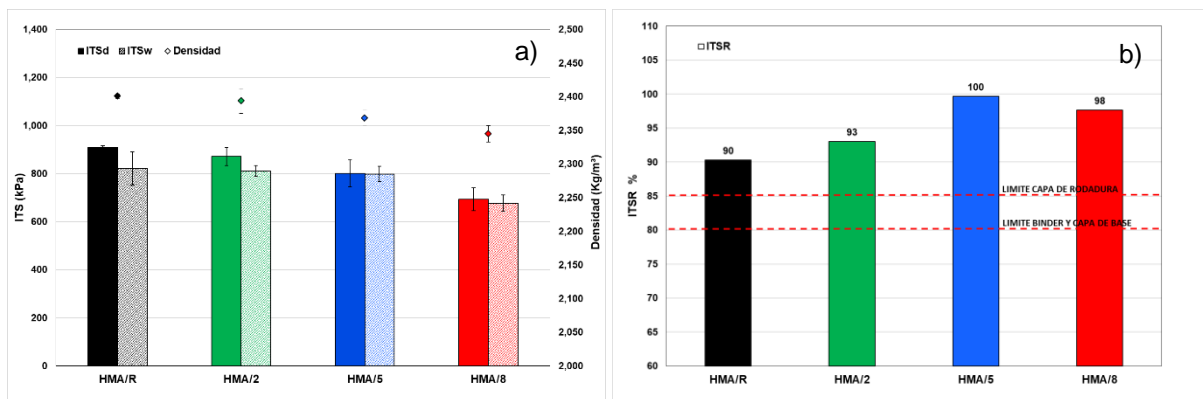


Figura 6. (a) Resistencia a la tracción indirecta en muestras secas y húmedas; (b) Índice de resistencia a la tracción indirecta en todas las mezclas evaluadas.

Adicionalmente, la Figura 6.b muestra que las mezclas con la adición de 2%, 5% y 8% de aditivo a base de FTNFU registraron un buen desempeño del índice de resistencia a la tracción indirecta (ITSr), con valores superiores a los de la mezcla de referencia y según los límites exigidos por las normas europeas para capas base e intermedias ($ITSr > 80\%$) y para capas de rodadura ($ITSr > 85\%$) [41]. Estos resultados indicaron que el aditivo a base de FTNFU tiene un efecto positivo en la susceptibilidad a la humedad para contenidos de 2% y 5%, a pesar de requerir mayor energía de compactación para lograr una densidad de mezcla de referencia similar. En otras palabras, el uso del aditivo desarrollado no afecta la capacidad de adhesión y cohesión interna en la matriz árido-aglomerante de la mezcla, reduciendo la posibilidad de provocar “stripping”. Estos resultados concuerdan con diferentes estudios que abordaron la adición de fibras de diferente origen polimérico en mezclas asfálticas, donde se observó que estas fibras tienen un efecto positivo en la propiedad de daño por humedad [14,17].

Resistencia a la deformación permanente

La resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento se evaluó mediante el ensayo Hamburg Wheel Tracking Test (HWTT) de acuerdo con la norma AASHTO T 324. Este método determina la susceptibilidad a la deformación permanente y los efectos de decapado de probetas de mezcla asfáltica sumergidas en un baño de agua a $50 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta prueba proporciona información sobre la tasa de deformación permanente de una carga constante de 705 N aplicada a las muestras durante 10.000 ciclos (o 20.000 pases). Parámetros de rendimiento como la profundidad media de ahuellamiento (RD

por sus siglas en inglés), la pendiente de la curva de deformación entre los ciclos 5.000 y 10.000 (WTS por sus siglas en inglés) y el porcentaje de ahuellamiento media puede determinarse la profundidad (PRD por sus siglas en inglés). Además, esta prueba evalúa signos de daño por humedad a través de la pérdida de adhesividad entre el ligante asfáltico y los agregados (desprendimiento) debido a los efectos combinados del agua y la carga. Si ocurre este fenómeno, se puede observar un aumento en la pendiente de la curva de deformación. Se fabricaron y probaron cuatro probetas por tipo de mezcla asfáltica.

La evolución de la profundidad de ahuellamiento (RD) con respecto al número de pasadas de rueda obtenidas del Hamburg Wheel Tracking Test se muestra en la Figura 7. Los resultados indicaron que las mezclas con aditivo a base de FTNFU registraron valores de RD más bajos que la mezcla de referencia. Las mezclas con adición de 2%, 5% y 8% de aditivo a base de FTNFU mostraron una disminución de 34%, 37% y 29%, respectivamente, en el parámetro RD. Estos resultados fueron consistentes con los estudios realizados por Kim et al. (2018), Taherkhani et al. (2017) y Tapkin (2008) [16–18], quienes indicaron que las mezclas modificadas con fibras de polipropileno, poliéster y nylon mostraron valores más bajos en los parámetros relacionados con la deformación permanente en comparación con la mezcla de referencia utilizada en sus respectivos estudios. Este efecto está directamente relacionado con la formación de la red tridimensional generada por las fibras en las propiedades de unión fibra-matriz de la mezcla asfáltica, indicando que esta característica tiene un efecto importante en la resistencia a las deformaciones permanentes, según lo evaluado por el parámetro RD [14,15,37]. La mezcla con la adición de 5% de aditivo a base de FTNFU mostró la mayor tasa de reducción, con una diferencia máxima de 8,5 mm de profundidad en comparación con la mezcla de referencia, mientras que la mezcla con 2% de aditivo a base de FTNFU presentó la menor pendiente de deformación (WTS por sus siglas en inglés) entre 5000 y 10 000 ciclos. Adicionalmente, ninguna de las mezclas evaluadas presentó pérdida de adhesividad entre los agregados pétreos y el ligante asfáltico (“stripping”), exhibiendo un buen comportamiento frente al daño por humedad, lo cual concuerda con los resultados obtenidos del parámetro ITSr.

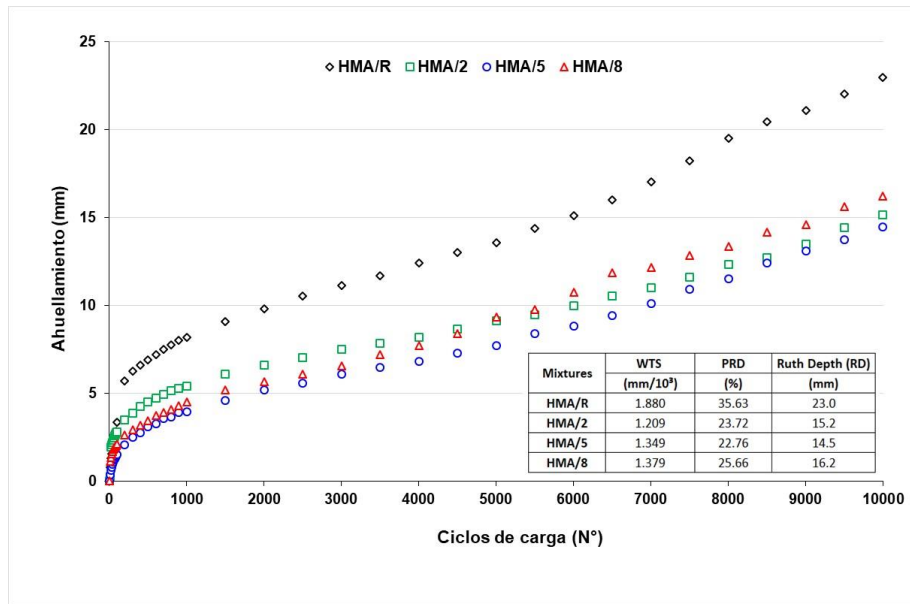


Figura 7. Resultados del Hamburg Wheel Tracking Test evaluado a 50°C.

En cuanto al porcentaje de vacíos de aire que establece la normativa ($7 \pm 1\%$), es importante señalar que, para alcanzar el porcentaje requerido, las mezclas con 2%, 5% y 8% de aditivo base WTTFF requirieron 1,5; 2,5 y 3,5 veces más energía de compactación, respectivamente, en comparación con la mezcla de referencia, para lograr el mismo nivel de densificación. Este fenómeno se puede atribuir a que el uso de fibras en las mezclas asfálticas reduce la compatibilidad de la mezcla [5]. Esto concuerda con lo ilustrado en la Figura 6.a, donde se observa que a medida que aumenta el contenido de aditivo, se reduce el valor de densidad para la misma energía de compactación.

Resistencia a la fisuración

La resistencia a la fisuración de las mezclas evaluadas se analizó mediante el ensayo Fénix. Este ensayo simula el modo I de fractura, que es el principal mecanismo de fisuración de una mezcla asfáltica [42]. Esta prueba se utiliza para medir la energía disipada durante el proceso de fisuración junto con los parámetros de tensión y desplazamiento. La prueba Fénix genera tensiones de tracción alrededor de la fisura inducida, utilizando el trabajo realizado para propagar la fisura a través del plano de fractura. El procedimiento de ensayo consiste en someter la mitad de una probeta cilíndrica a un esfuerzo de tracción a una velocidad de desplazamiento constante de 1 mm/min y temperatura específica. En el medio de su lado plano se hace una muesca de 6 mm de profundidad donde se fijan dos placas de acero. Cada placa está unida a un plato de carga para que puedan girar sobre los puntos de fijación. Los datos de carga y desplazamiento se registran a lo largo de la prueba para calcular los parámetros mecánicos involucrados en la fisuración. Los parámetros como la fuerza de tracción máxima ($F_{m\acute{a}x}$), la resistencia máxima (RT por sus siglas en inglés), el desplazamiento al 50 % de la fuerza de tracción posterior al máximo (d50PM) y el desplazamiento entre d50PM y dM (DT) se pueden determinar a partir de la curva de salida de carga-desplazamiento, mientras que el parámetro de energía disipada por unidad de área (GD por sus siglas en inglés) y el índice de tenacidad (TI por sus siglas en inglés) pueden determinarse mediante ecuaciones. GD está relacionado con el trabajo realizado dividido por

el área de fractura, y TI está relacionado con la capacidad de la mezcla asfáltica para mantener unidos sus componentes una vez alcanzada su máxima resistencia. Se fabricaron y ensayaron tres probetas por cada mezcla evaluada, considerando dos temperaturas: 0 °C y 10 °C.

Los parámetros del ensayo Fénix relacionados con la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas evaluadas se muestran en la Figura 8. El efecto del aditivo sobre la fuerza máxima de tracción ($F_{m\acute{a}x}$) y sobre la capacidad de flexión de la mezcla (d_{50PM}) se observa en la Figura 8.a. A una temperatura de 0 °C, las mezclas con 2% y 5% de aditivo a base de FTNFU mostraron una $F_{m\acute{a}x}$ similar a la mezcla de referencia, pero una disminución en el parámetro d_{50PM} . Sin embargo, para mezclas con 8% de aditivo a base de WTTF, se observó una $F_{m\acute{a}x}$ menor y una mayor capacidad de flexión que la mezcla de referencia. Además, a 10 °C, todas las mezclas evaluadas con aditivo a base de FTNFU mostraron un comportamiento similar en la capacidad de resistir esfuerzos de tracción y valores superiores en la capacidad de flexión que la mezcla de referencia. Los resultados obtenidos para la energía disipada en el proceso de fisuración (GD por sus siglas en inglés) y el índice de tenacidad (TI por sus siglas en inglés) se pueden observar en la Figura 8.b. En cuanto a la energía disipada, se observaron valores similares entre las mezclas con diferentes contenidos de aditivo a base de FTNFU para ambas temperaturas evaluadas. Sin embargo, a 0 °C, las mezclas con diferentes contenidos de aditivo a base de FTNFU mostraron una disminución promedio de 11 % en relación a la mezcla de referencia, mientras que a 10 °C presentaron un aumento promedio de 17 % en el parámetro GD. El efecto del aditivo de FTNFU sobre el índice de tenacidad (TI) a una temperatura de 0 °C mostró un comportamiento similar a la mezcla de referencia para los contenidos de 5% y 8% de aditivo a base de FTNFU, con una ligera disminución para el 2% de contenido. Por el contrario, a 10 °C, todos los porcentajes de contenido de aditivo evaluados mostraron un aumento promedio del 79% en el valor de TI con respecto a la mezcla de referencia. Estos resultados mostraron que el aditivo a base de FTNFU tiene un mayor efecto a una temperatura de 10 °C, lo que indica que las mezclas requieren más trabajo para producir fisuración, y, al mismo tiempo, las mezclas presentan mayor tenacidad por haber alcanzado su máxima resistencia.

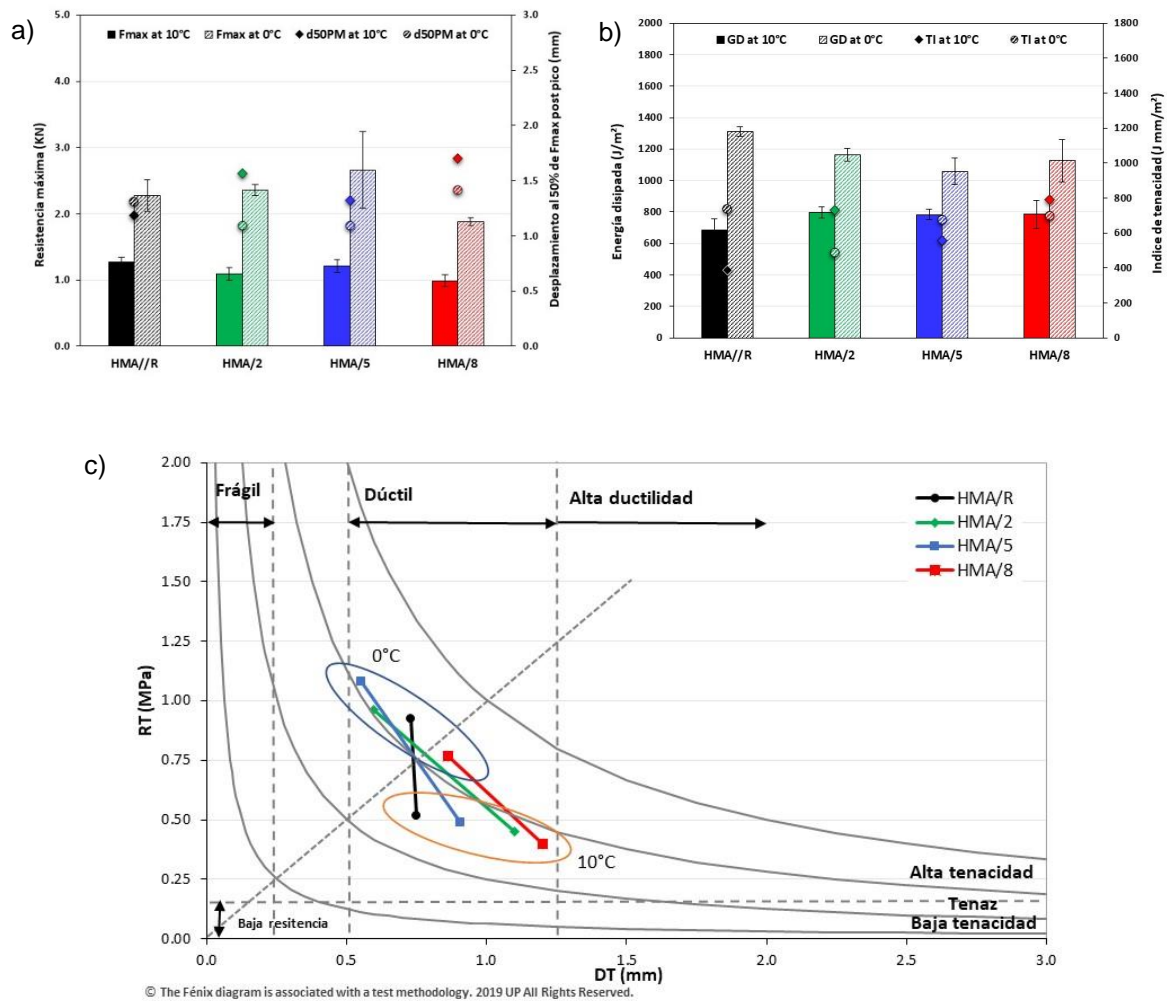


Figura 8. Parámetros del test Fénix: (a) Fuerza de tracción máxima vs Capacidad de flexión; (b) Energía disipada vs Índice de tenacidad; (c) Diagrama Fénix de tensión-deformación a temperatura de 0 °C y 10 °C.

La Figura 8.c muestra el Diagrama Fénix de Tensión-Deformación, el cual es un procedimiento establecido para la caracterización de mezclas bituminosas de acuerdo con dos parámetros importantes de la mezcla para definir su comportamiento [43]. Los resultados indicaron que la respuesta de las mezclas con el aditivo a base de FTNFU mostró un mayor incremento en su ductilidad entre las temperaturas evaluadas de 0 °C y 10 °C. A 10 °C se observó una ductilidad mejorada en comparación con la mezcla de referencia, para valores de resistencia máxima similares.

ETAPA 3: EVALUAR LAS PROPIEDADES DE DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO SMA REEMPLAZANDO LAS FIBRAS O PELLET DE CELULOSA POR EL ADITIVO GRANULADO DE FTNFU.

El objetivo de esta etapa consistió en evaluar el efecto del aditivo granulado de FTNFU como reemplazo del aditivo comercial de celulosa utilizado en mezclas SMA. Para ello, se tuvo que realizar y validar el diseño de una mezcla de referencia (SMA/R), de acuerdo con lo exigido en la normativa chilena. Para luego determinar el efecto del reemplazo de tres porcentajes de aditivo granular de FTNFU por el aditivo

comercial de celulosa, en función del cumplimiento de las especificaciones de la normativa chilena Esto con la finalidad de evaluar las propiedades de desempeño, tanto a la SMA/R como a las mezclas SMA con aditivo granular de FTNFU. En este ámbito, se evaluó la resistencia a la fisuración térmica, módulo de rigidez, resistencia al daño por humedad y a la deformación permanente.

➤ **CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES**

El ligante asfáltico utilizado en este estudio corresponde a un ligante asfáltico modificado con Polybit 60/80 bajo los estándares de la normativa chilena. Los agregados utilizados eran de origen fluvial, los cuales se clasificaron en tres fracciones: gravilla 1/2”, gravilla 3/8” y polvo de roca 1/4”. Además, se contempló el uso de un 8% de relleno mineral (Sopracal) sobre el peso de los áridos (Tabla 5). El aditivo granular se encuentra conformado por FTNFU con gránulos de caucho, emulsión asfáltica catiónica tipo CRS-2, y polvo de caucho como agente anti-aglomerante. Las características de los aditivos utilizados se muestran en la Tabla 6. Adicionalmente en la Figura 9 se muestra una comparación visual entre los dos aditivos utilizados.

Tabla 5. Propiedades de ligante asfáltico y áridos utilizados en las mezclas SMA.

Propiedades	Resultados	Especificaciones
LIGANTE ASFÁLTICO POLYBIT 60-80		
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s (0.1 mm)	62	Mín. 60 – Max. 80
Punto de ablandamiento r y b (°C)	72,4	Mín. 60
Ductilidad a 25 °C (cm)	112	Mín. 80
Índice de Penetración (IP)	3,8	Mín. +2,0
Índice de Fraass, °C	-15	Máx. -15
AGREGADO GRUESO		
Desintegración en Sulfato de Sodio	0,3	Máx. 12
Pérdida de abrasión Los Ángeles (%)	14	Máx. 25
Agregados chancados (%)	96	Mín. 90
Adherencia Método Estático (%)	+95	Mín. 95
Adherencia Método Dinámico (%)	+95	Mín. 95
AGREGADO FINO		
Índice de plasticidad (%)	N.P.	N.P.
Adherencia Riedel – Weber (%)	4 - 9	Mín. 0 - 5
Desintegración en Sulfato de Sodio	1,0	Máx. 15
AGREGADO COMBINADO		
Sales solubles (%)	0	Máx. 2
Arena equivalente (%)	53	Mín. 50
Absorción de agua	1,2	Máx. 2

Tabla 6. Propiedades de aditivos evaluados en mezclas SMA.

Aditivo utilizado	Diámetro, mm	Longitud, mm	Densidad aparente, g/cm ³
Aditivo Fityre tipo 2	3.6 – 5.8	4.8 – 12.1	0.25
Aditivo comercial de celulosa	4.0 – 4.8	4.3 – 12.4	0.38



Figura 9. Imagen comparativa entre el aditivo Fityre tipo 2 y el aditivo comercial de celulosa para mezclas SMA.

➤ DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DE REFERENCIA SMA/R

El diseño de la mezcla de referencia se realizó de acuerdo a las especificaciones de la Norma Chilena. El diseño de la SMA/R y la determinación del contenido óptimo de asfalto (COA) se llevó a cabo utilizando el Método de Diseño Marshall y Superpave (Ver Figura 10), cumpliendo las especificaciones chilenas. Se obtuvo un contenido de asfalto de 6,8% sobre el agregado y cumplió con los requisitos de estabilidad (kN), flujo (0,25 mm), vacíos de aire (porcentaje), vacíos en agregado mineral VAM (porcentaje), vacíos de la fracción gruesa VCA, y el parámetro de escurrimiento del ligante (porcentaje).

➤ DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA PARA TRES CONTENIDOS DE REEMPLAZO

Se fabricaron mezclas SMA con un 100%, 75% y 25% de reemplazo del contenido de aditivo comercial de celulosa utilizado en mezcla SMA/R (0.5 sobre el agregado). Para la fabricación de estas mezclas se mantuvieron los criterios de diseño de la mezcla SMA/R. Todas las mezclas cumplieron con los requisitos establecidos por la normativa chilena tal como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Cumplimiento de especificaciones técnicas de mezclas tipo SMA evaluadas con distinto porcentaje de reemplazo de fibra de celulosa por aditivo en base a FTNFU.

Tipo de mezcla	T° de fabricación (°C)	Cont. de ligante (% por peso de agregado)	Aditivo FTNFU (% referido al 0.5% de agregado)	Aditivo de celulosa	Densidad (kg/m ³)	Vacíos de aire (%)	VMA 0,25 mm	VCA _{MIX} (%)	VCA _{DRC} (%)	Escurrimiento del ligante (%)
SMA/R	177	6,8	0	100	2.333	4,2	18,2	31,3	40,1	0,12
SMA/100	177	6,8	100	0	2.328	4,2	18,4	31,2	40,1	0,17
SMA/75	177	6,8	75	25	2.324	4,3	18,5	31,2	40,1	0,15
SMA/50	177	6,8	50	50	2.335	4,0	18,1	31,2	40,1	0,11
ESPECIFICACIONES CHILENAS						4	>15	VCA _{MIX} < VCA _{DRC}		Máx. 0,3



Figura 10. Imágenes de fabricación de probetas de mezclas asfálticas tipo SMA.

➤ EVALUACION DE LAS PROPIEDADES DE DESEMPEÑO DE LAS MEZCLAS

Para determinar el efecto del uso del aditivo granular de FTNFU en las mezclas SMA, se realizó la evaluación de las propiedades mecánicas relacionadas con el desempeño de las mezclas en pavimento.

Resistencia a la fisuración

La resistencia a la fisuración de las mezclas a la temperatura de 0°C y 10°C se determinó mediante el ensayo Fénix. En base a estos resultados es posible observar que tanto a la temperatura de 0°C como a 10°C la mezcla SMA/100 mostro un buen desempeño en los parámetros evaluados (Figura 11). Es más, a 0°C los resultados mostraron que mediante el reemplazo del 100% del aditivo comercial de celulosa por el aditivo granular de FTNFU, es posible mantener la fuerza máxima a tracción (Fmáx) de

la mezcla SMA/R y aumentar la capacidad de flexión de las mezclas ante la rotura (Δmdp). Esto demuestra que el uso de aditivo granular de FTNFU en mezclas SMA permite mantener las propiedades de la mezcla de referencia, presentando una buena cohesión y una respuesta más deformable a menores temperaturas. En cuanto a las mezclas SMA/75 y SMA/50 es posible observar que en general no se observa un efecto en los parámetros Fénix evaluados.

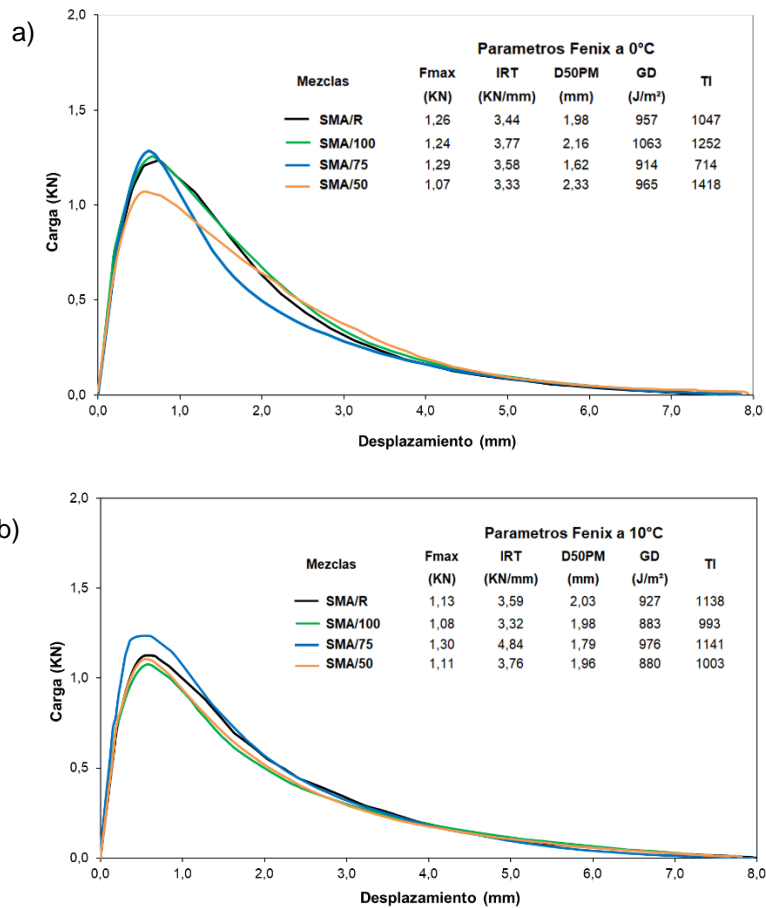


Figura 11. Resultado de ensayo Fénix a (a) 0°C y (b) 10°C en mezclas SMA.

Módulo de rigidez

Los resultados de la propiedad módulo de rigidez, mostraron que a la temperatura de 20°C las mezclas presentaron valores de modulo similares a la mezcla SMA/R (Figura 12). Lo anterior demostró que el uso de aditivo granular de FTNFU, no afecto el comportamiento de la mezcla frente a esta propiedad. Por tanto, mediante el reemplazo del 100% del aditivo comercial de celulosa por el aditivo granular de FTNFU, es posible mantener el comportamiento mecánico de la mezcla SMA/R frente a esta propiedad.

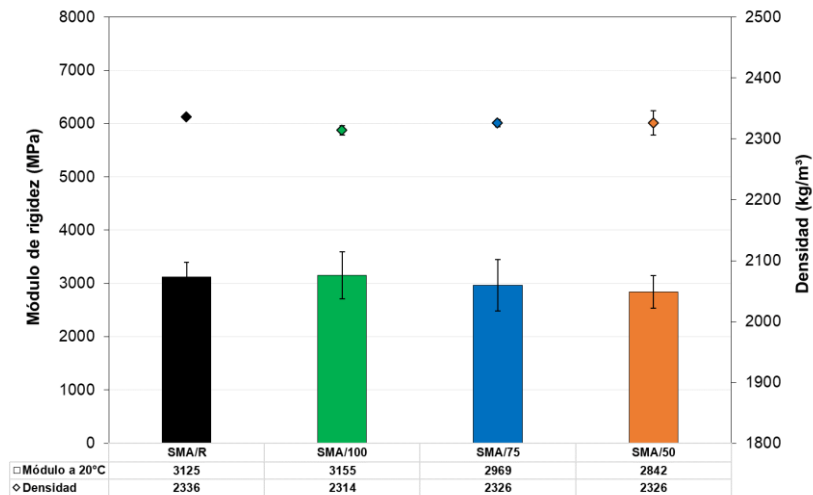


Figura 12. Resultados de medición de módulo de rigidez en mezclas SMA con distintos porcentajes de reemplazo de fibra de celulosa por aditivo en base a FTNFU.

Sensibilidad al agua

Los resultados de la resistencia a tracción indirecta de las mezclas SMA evaluadas en condiciones secas (ITS_d) y húmedas (ITS_w) mostraron valores promedios similares en el parámetro ITS con respecto a la mezcla SMA/R. Lo anterior demostró que el uso de aditivo granular de FTNFU no afectó el comportamiento de las mezclas frente a esta propiedad. Por otro lado, todas las mezclas cumplen con lo establecido por la norma española (pliego de prescripciones técnicas español PG-3), presentando un valor en el parámetro de resistencia conservada a tracción indirecta (ITSR) superior al 85%. Por tanto, todas las mezclas son aptas para ser utilizadas como capa de Base o Intermedia ($ITSR > 80\%$) y para ser utilizadas como capa de rodadura ($ITSR > 85\%$) (Figura 13). Lo anterior, además permite indicar que las mezclas tienen una buena capacidad de adhesión y cohesión en su matriz árido-ligante, reduciendo la posibilidad de que se produzca stripping.

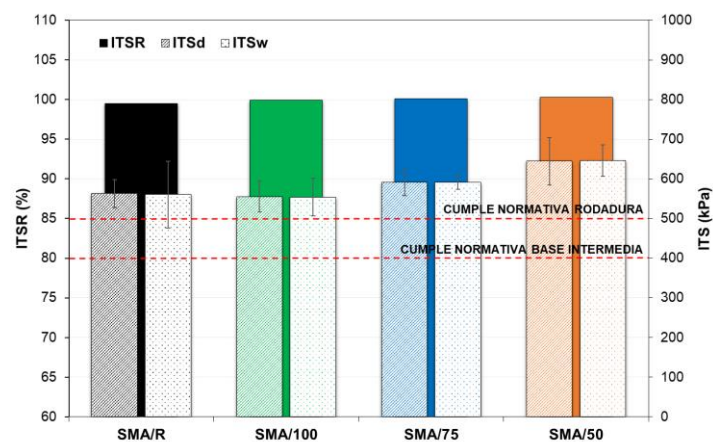


Figura 13. Resultados de medición de sensibilidad al agua en mezclas SMA con distinto reemplazo de fibra de celulosa por aditivo en base FTNFU.

Resistencia a la deformación permanente

La resistencia a la deformación permanente de las mezclas se determinó mediante la prueba de Hamburg Wheel Tracking. Este ensayo permite determinar el grado de deformación permanente y stripping de las mezclas asfálticas al ser sometidas a una carga de 705 ± 4.5 (N) a una velocidad de 26 ciclos por minuto y a una temperatura de 50°C . Los resultados muestran que todas las mezclas evaluadas presentaron una baja tasa de deformación en comparación a lo observado en las mezclas asfálticas convencionales (Figura 14). Esto se debe a que las mezclas SMA utilizan una mayor cantidad de árido grueso y que en su conjunto con el uso de un ligante asfáltico modificado, otorga una mayor adhesión y cohesión a las mezclas. De acuerdo con los resultados al reemplazar el 100% del aditivo comercial de celulosa es posible mantener el comportamiento de la mezcla de referencia SMA/R frente a esta propiedad con una diferencia de 0.1 mm en el parámetro RD. Por otro lado, todas las mezclas evaluadas con aditivo en base a FTNFU presentaron una menor pendiente de ahuellamiento (WTS) entre el ciclo 5.000 y 10.000. Además, no se observó un cambio de pendiente en las curvas de ahuellamiento, lo que significa que ninguna mezcla presentó stripping durante el ensayo. Esto significa, que las mezclas tuvieron un buen comportamiento frente al daño por humedad, lo que se contrasta con los resultados obtenidos del parámetro ITSr.

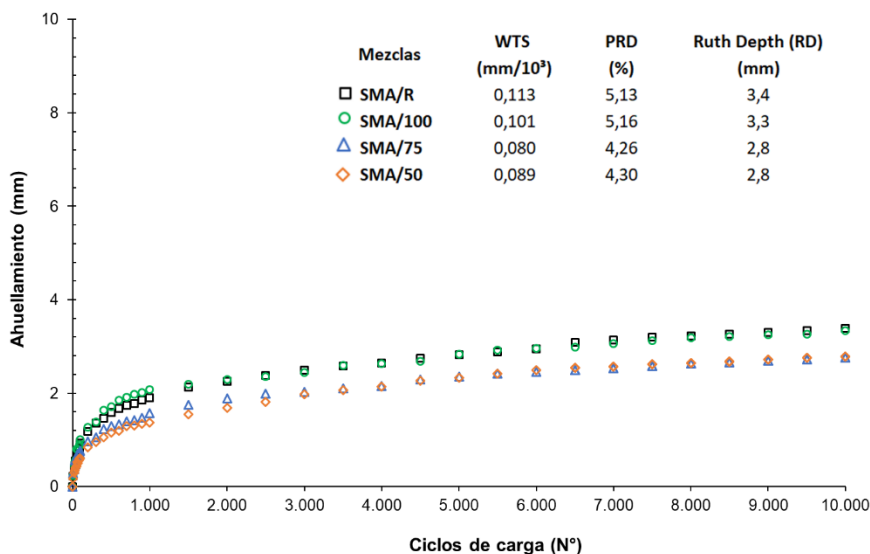


Figura 14. Resultado de ensayo Hamburg Wheel Tracking en mezclas SMA con distintos porcentajes de reemplazo de fibra de celulosa por aditivo en base a FTNFU.

ETAPA 4: DISEÑAR Y FABRICAR UN EQUIPO A ESCALA DE LABORATORIO PARA LA PRODUCCIÓN MECÁNICA DEL ADITIVO GRANULAR DE FTNFU.

El propósito de esta etapa es diseñar y desarrollar un equipo mecánico que cumpla con los requerimientos técnicos para la manufactura del aditivo granular de FTNFU. En base a lo anterior, se realizó un protocolo de fabricación del aditivo granular de FTNFU de manera mecánica, evaluando

cómo los factores temperatura y diámetro de salida del disco extrusor afectan en la fabricación del aditivo en cuanto a sus propiedades de densidad y diámetro final.

➤ PROTOCOLO DE FABRICACIÓN DE ADITIVO GRANULAR DE MANERA MECÁNICA

El protocolo de fabricación del aditivo sigue el proceso descrito en la Figura 15. Comenzando por la limpieza de la FtNFU hasta concluir con la producción del aditivo en formato granular, considerando factores de extrusión como la temperatura y diámetro de disco.

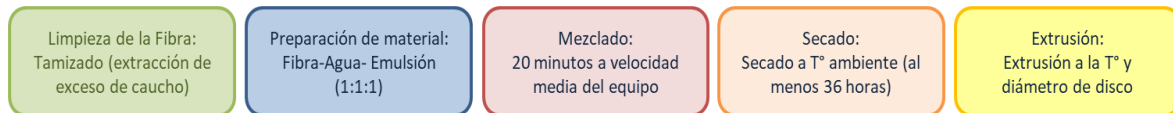


Figura 15. Protocolo de fabricación del aditivo granular de manera mecánica.

Limpieza de la fibra: El proceso de limpieza de la fibra se realizó para eliminar el exceso de caucho retenido en el entramado de la fibra producto del procesamiento de los NFU. Luego del tamizado, de cada 100 g de fibra se recuperaron 50 g de fibra con menor contenido de caucho y 50 gramos de caucho.

Preparación del material: La fibra limpia se pesa para determinar la masa de emulsión asfáltica tipo CRS-2 y agua a utilizar, siguiendo una proporción en masa de 1:1:1. Luego, el agua y la emulsión asfáltica se mezclan y homogenizan de forma manual.

Mezclado: La fibra limpia y la emulsión asfáltica se mezclan en una mezcladora vertical con batidor helicoidal durante 20 min a velocidad media, logrando una buena impregnación de la emulsión entre la fibra.

Secado: El material mezclado se dispone en bandejas metálicas para su secado a temperatura ambiente por 36 h.

Extrusión: El material seco se carga en el equipo extrusor, el cual posee un disco de extrusión de diámetro de salida de acuerdo con el tipo de aditivo a fabricar. Luego, se procede a acondicionar el equipo cargado a la temperatura de operación definida según el tipo de aditivo. Finalmente, se procede a la extrusión del material y posterior corte, generando los pellets.

➤ EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE OPERACIÓN EN PROCESO DE EXTRUSIÓN

El objetivo de la extrusión mecánica es lograr producir dos tipos de aditivos granulares, denominados Fityre tipo 1, el cual se utilizará en mezclas asfálticas convencionales, y Fityre tipo 2, el cual se utilizará en mezclas asfálticas tipo SMA. El Fityre tipo 2 debe ser más denso y de menor diámetro que el Fityre tipo 1. Para producir pellets mecanizados con características de diámetro y densidad similares a aquellos elaborados de forma manual, se desarrollaron distintos equipos extrusores, evaluando como variables de operación la temperatura y el diámetro de orificio de salida del extrusor.

En el transcurso del desarrollo del equipo extrusor se llegó finalmente a la fabricación de un equipo extrusor 3, el cual consta de una tolva de alimentación, un pistón de extrusión con control de

temperatura, cabezales o discos de extrusión con distintos diámetros de salida (5,5 y 3,5 mm en disco plano, y 3,5 mm en disco cónico) y un sistema de corte con cuchillos rotatorios (ver Figura 16).



Figura 16. (a) Equipo extrusor 3; (b) Disco de extrusión plano de 5,5 mm de diámetro de salida; y (c) Disco de extrusión cónico de 3,5 mm de diámetro de salida.

Con el equipo extrusor 3 se realizaron pruebas a distintas temperaturas y con los distintos cabezales de extrusión, midiendo los diámetros y las densidades aparentes de los pellets obtenidos, buscando obtener valores similares a aquellos producidos de forma manual. La Figura 17 muestra los resultados de diámetro y densidad aparente obtenidos a distintas temperaturas con el disco plano de 3,5 mm. A 30°C, el material presentó gran dificultad para fluir a través del cabezal extrusor y, por lo tanto, su rendimiento fue deficiente. Al aumentar la temperatura, la fluidez del material mejoró y aumentó la

velocidad de producción. Sin embargo, se genera un aumento del diámetro y una disminución de la densidad aparente, por lo que se dificulta conseguir la densidad requerida para el aditivo Fityre tipo 2. Debido a lo anterior, se realiza una prueba a mayor temperatura (55°C) y adicionalmente se aplica una etapa de compactación manual, logrando diámetros más homogéneos y un aumento en la densidad aparente.

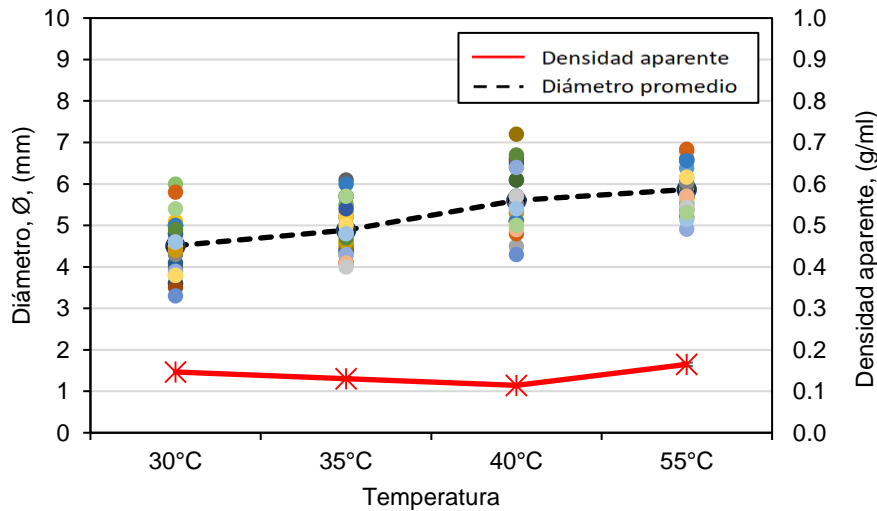


Figura 17. Resultado de ensayos realizados en equipo extrusor 3 con disco de 3,5 mm a distintas temperaturas.

Adicionalmente se realizaron pruebas de extrusión con un tercer cabezal de 3,5 mm de orificio de salida, pero con el diseño cónico interno, con la finalidad de aumentar la compactación del material a extruir, y eliminar el proceso manual posterior a la extrusión. Los ensayos realizados con el disco cónico a 50°C muestran buena fluidez del material a través del cabezal de extrusión y una disminución del diámetro en promedio, comparado con los resultados obtenidos con el disco simple de 3,5 mm a 55°C, lo que permitirá fabricar el aditivo Fityre tipo 2 (Ver Figura 18).

Con el disco extrusor de 5,5 mm se realizaron pruebas entre 30° y 35°C, mostrando una buena fluidez del material a través del cabezal de extrusión. A 33°C se obtuvo un diámetro promedio de 7,2 mm y una densidad aparente de 0,167 g/ml. Con estas condiciones, el pellet producido cumple con los requerimientos para fabricar el aditivo Fityre tipo 1, con densidad aparente mínima de 0,15 g/ml. La Figura 18 muestra los resultados de diámetro y densidad aparente de pellets obtenidos de manera manual y de aquellos obtenidos con el equipo extrusor y sus distintos cabezales de extrusión. La Figura 19 muestra una imagen comparativa de los pellets obtenidos con el extrusor 3 y sus distintos cabezales de extrusión.

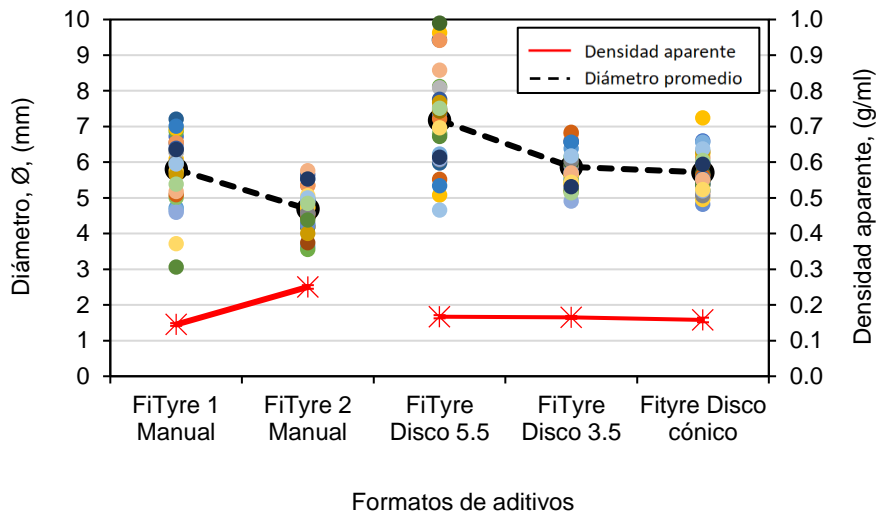


Figura 18. Resultados obtenidos en equipo extrusor 3 con distintos cabezales de extrusión y comparados con los aditivos producidos de manera manual.

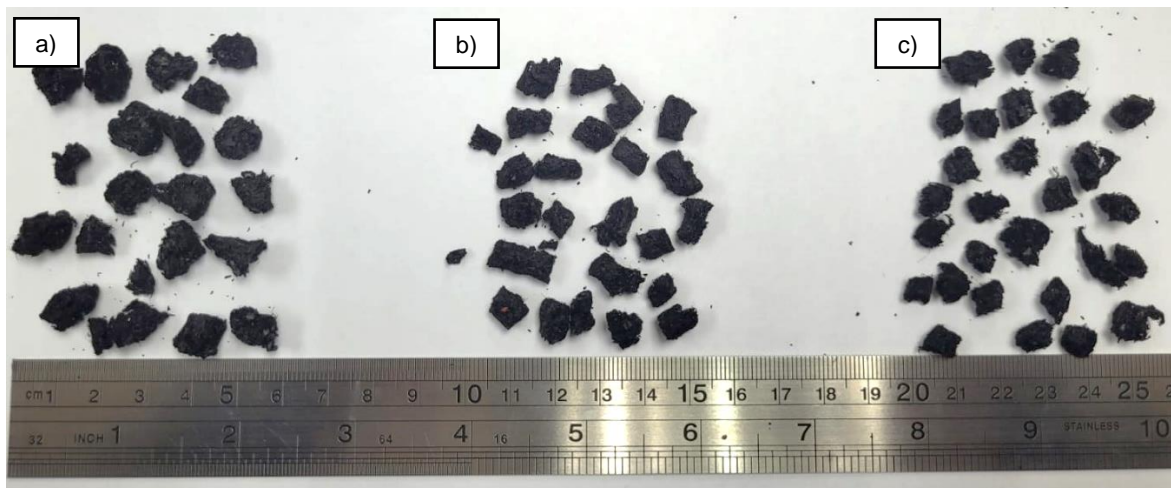


Figura 19. Imagen comparativa de pellets mecanizados obtenidos en el equipo extrusor 3 con (a) disco de 5,5 mm; (b) disco de 3,5 mm; y (c) disco cónico de 3,5 mm.

ETAPA 5: EVALUAR LA PROPIEDAD CRÍTICA DE FATIGA A MEZCLAS DENSAS Y SMA, CON CONTENIDO ÓPTIMO DE ADITIVO GRANULAR DE FTNFU FABRICADO DE MANERA MECÁNICA.

➤ PROPIEDAD CRÍTICA DE FATIGA EN MEZCLAS DENSAS

Se evaluó el efecto del aditivo Fityre tipo 1 producido de forma manual y mecanizada en la durabilidad a fatiga de la mezcla convencional HMA, en una estructura de pavimento con diferentes espesores de capa de rodadura. Los parámetros utilizados de la estructura de pavimento fueron ingresados al software MePads, con el cual se realizó el cálculo de tensiones y deformaciones, las cuales fueron modeladas en las leyes de fatiga obtenidas experimentalmente. En este sentido, se simuló el comportamiento de una estructura bajo cargas de un eje de rodado doble de 80 y 110 kN, variando el espesor de la mezcla asfáltica, con la finalidad de obtener un barrido de deformaciones. Luego, por

medio de las deformaciones obtenidas y las leyes de fatiga de las mezclas evaluadas, se analizó la durabilidad de las estructuras de pavimento compuestas por las mezclas evaluadas.

En la Figura 20 se muestran los análisis de durabilidad para distintos espesores de las mezclas analizadas, donde es posible observar que, para un espesor estándar de 15 cm, las estructuras de pavimento compuestas por las mezclas HMA con un contenido de 2% en peso del ligante del aditivo Fityre tipo 1 de fabricación manual (HMA/2 MAN) y con el mismo contenido del aditivo Fityre tipo 1 de fabricación mecanizada (HMA/2 MEC) presentan un aumento de durabilidad de hasta un 92% y 128% respecto a la mezcla de referencia (HMA/R). Lo anterior tiene relación con los resultados obtenidos experimentalmente, de módulo de rigidez y leyes de fatiga. Por una parte, las mezclas HMA que utilizaron el aditivo Fityre tipo 1 presentaron un aumento en el módulo de rigidez respecto a la mezcla HMA/R, y a su vez, registraron menores deformaciones en tracción para los ejes de carga evaluados. Es más, al evaluar estas deformaciones en las leyes de fatiga obtenidas, es posible determinar que las HMA/2 pueden registrar un mayor número de ciclos. En resumen, los resultados indican que las mezclas convencionales que utilizaron el aditivo Fityre tipo 1 presentan un aumento en la resistencia mecánica al daño por fatiga, registrando una mayor vida útil de la estructura de pavimento (el doble de duración aproximadamente) para los diferentes espesores de mezcla asfáltica evaluados.

➤ PROPIEDAD CRÍTICA DE FATIGA EN MEZCLAS TIPO SMA PARA REEMPLAZO DE FIBRA DE CELULOSA

De la etapa 3 del proyecto se obtuvo que el porcentaje óptimo de reemplazo de las fibras de celulosa comercial por el aditivo Fityre tipo 2 en mezclas tipo SMA fue de un 100%. En esta etapa se pudo establecer que, de acuerdo con los resultados obtenidos, el uso del aditivo Fityre tipo 2 permite mantener las propiedades de diseño y desempeño de la mezcla asfáltica, sin afectar su resistencia frente a la deformación permanente, módulo de rigidez, daño por humedad y resistencia a la fisuración térmica. Es decir, el reemplazo del aditivo no afecta estas propiedades de desempeño.

En esta etapa 5, se evaluó el efecto del reemplazo del 100% de aditivo comercial de celulosa por el aditivo Fityre tipo 2, producido de forma manual y mecanizada, en la durabilidad a fatiga de la mezcla SMA. Esto se realizó para una estructura de pavimento con diferentes espesores de capa de rodadura. Los parámetros utilizados de la estructura de pavimento fueron ingresados al software MePads, con el cual se realizó el cálculo de tensiones y deformaciones, las cuales fueron modeladas en las leyes de fatiga obtenidas experimentalmente. En este sentido, se simuló el comportamiento de una estructura bajo cargas de un eje de rodado doble de 80 y 110 kN, variando el espesor de la mezcla asfáltica, con la finalidad de obtener un barrido de deformaciones. Luego, por medio de las deformaciones obtenidas y las leyes de fatiga de las mezclas evaluadas se analizó la durabilidad de las estructuras de pavimento compuestas por las mezclas evaluadas.

En la Figura 21 se muestran los análisis de durabilidad para distintos espesores de las mezclas analizadas, donde es posible observar que, para un espesor estándar de 15 cm, las estructuras de pavimento compuestas por las mezclas SMA con un 2% de contenido del aditivo Fityre tipo 2 de fabricación manual (SMA/2 MAN) en peso del ligante y con el mismo porcentaje del aditivo Fityre tipo

2 de fabricación mecanizada (SMA/2 MEC) presentan un aumento de durabilidad de hasta un 111% y 105% respecto a la mezcla de referencia (SMA/R). Lo anterior tiene relación con los resultados obtenidos experimentalmente de las leyes de fatiga. Las mezclas SMA que utilizaron el aditivo Fityre tipo 2, presentaron valores de módulo de rigidez muy similares a la mezcla SMA/R, con valores similares de deformaciones en tracción para los ejes de carga evaluados. Sin embargo, las leyes de fatiga registraron una mayor durabilidad para cada nivel de deformación evaluado. Por ello, al evaluar las deformaciones determinadas en la modelación de las estructuras de pavimento en las leyes de fatiga obtenidas, es posible determinar, que las SMA/2 pueden registrar un mayor número de ciclos. En resumen, los resultados indican que las mezclas que utilizaron el aditivo Fityre tipo 2 presentan un aumento en la resistencia mecánica al daño por fatiga, registrando una mayor vida útil de la estructura de pavimento (el doble de duración aproximadamente) para los diferentes espesores de mezcla asfáltica evaluados.

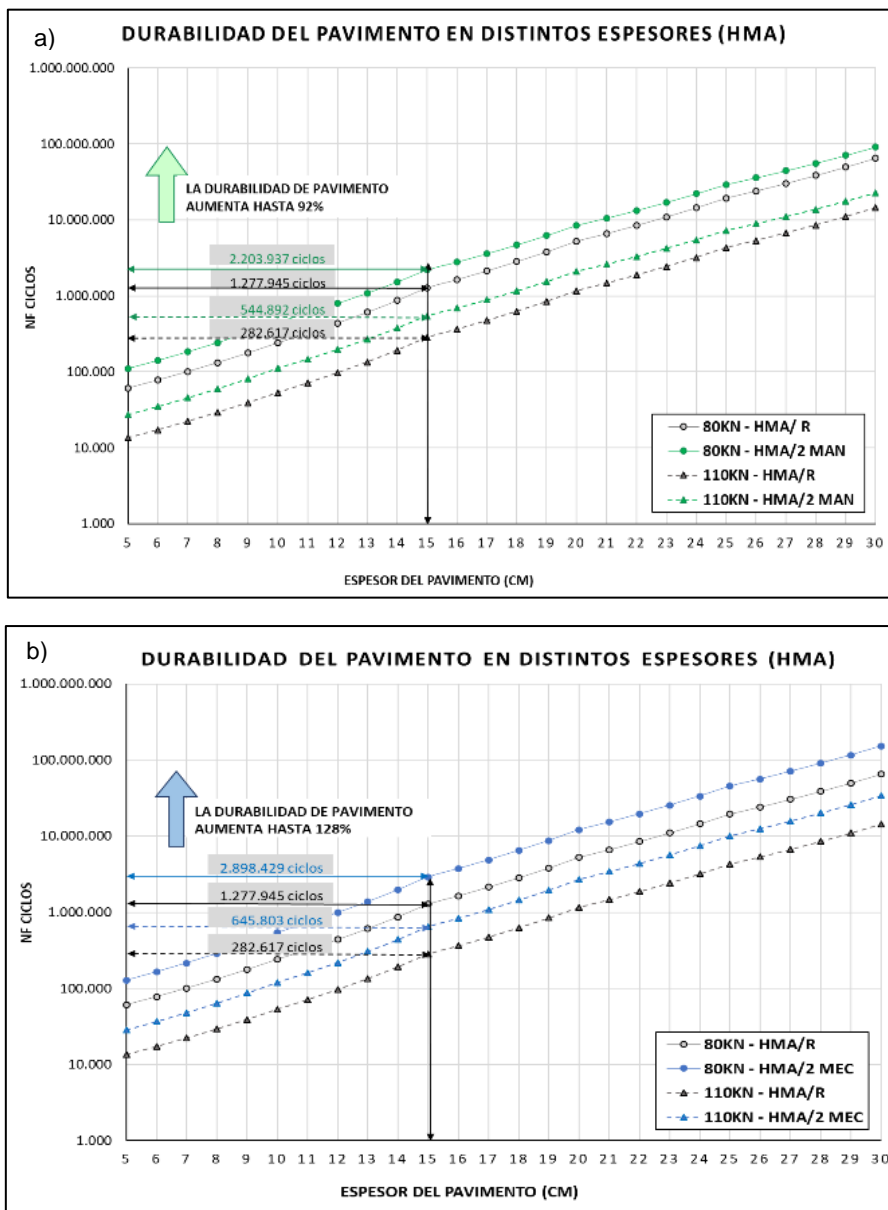


Figura 20. Análisis de durabilidad en mezcla evaluadas (e=15 cm); (a) HMA/2 MAN; (b) HMA/2 MEC.

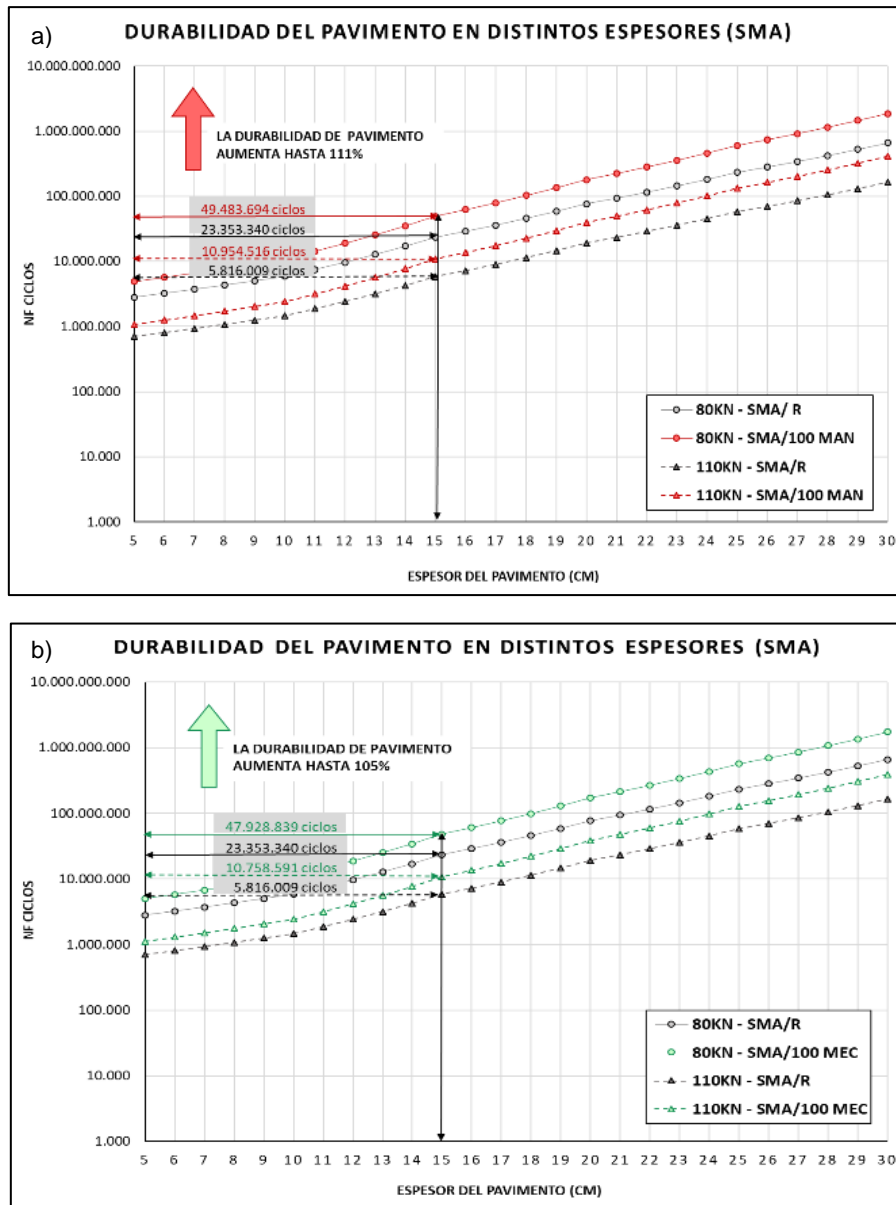


Figura 21. Análisis de durabilidad en mezcla evaluadas ($e=15$ cm); (a) SMA/100 MAN; (b) SMA/100 MEC.

ETAPA 6: EVALUAR LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL Y SOCIAL DEL ADITIVO GRANULADO DE FTNFU.

- CONTRIBUCIÓN A LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DE ADITIVOS ASFÁLTICOS INNOVADOS A PARTIR DE FIBRA TEXTIL DE NEUMÁTICO FUERA DE USO

Los neumáticos están compuestos de caucho, fibras metálicas y fibras textiles. En la mayoría de los estudios en los que se reutilizan neumáticos fuera de uso (NFU), se reporta la reutilización principalmente de caucho y fibras metálicas. Estudios en los que se aborde la reutilización de las fibras textiles son escasos. Además, la mayoría de los estudios en los que se utilizan fibras o caucho se centran principalmente en las mejoras mecánicas que ofrece el uso de fibras en mezclas asfálticas [44–

46]. Sin embargo, es necesario determinar si las ventajas en términos de resistencia mecánica superan las desventajas en términos ambientales de tener que producir un nuevo aditivo/fibra [47]. En este sentido, en esta etapa se aborda el nicho no cubierto hasta el momento en lo que respecta a la comparación de las cargas ambientales que se derivan del uso de diferentes tipos de fibras en las mezclas asfálticas y adicionalmente, se reportan las cargas ambientales del uso de Fityre en mezclas asfáltica HMA y SMA.

En el caso de las mezclas convencionales de HMA, la comparación de las cargas ambientales se realiza entre las fibras de vidrio, fibra de poliéster, fibra de aramida y Fityre tipo 1. Para SMA, la comparación se realiza entre el uso de distintas proporciones de fibra de celulosa pelletizada premezclada con asfalto (FCP) y Fityre tipo 2. Los resultados se comparan utilizando varios indicadores ambientales (por ejemplo, cambio climático, uso de recursos no renovables, consumo de agua, acidificación terrestre) para una comparación objetiva de las cargas ambientales de las diferentes fibras. El análisis de ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés) se realizó utilizando el software SimaPro, ya que este tiene una base de datos en la que se reportan las cargas ambientales de la mayoría de las fibras para comparar, y también puede modelar nuevos procesos/productos como el uso de Fityre.

Tanto los flujos de entrada en los procesos y los recursos unitarios como los flujos de salida involucrados en el desarrollo de la fibra de vidrio, fibra de poliéster, fibra de aramida ya están identificados en la base de datos de SimaPro [48]. Por lo tanto, para este estudio se utilizó el análisis de inventario existente en la base de datos SimaPro para dichas fibras. Por otro lado, la fabricación de pellets a base de celulosa (PCF) también está disponible en la base de datos de SimaPro. Sin embargo, no es equivalente al pellet utilizado en las mezclas asfálticas. Por lo tanto, para emular la fabricación de una unidad de masa de PCF, se utilizó como materia prima de entrada un 66% de fibra de celulosa extraída de pinos y un 34% de betún junto con el proceso existente para la fabricación de pellets [49].

Por otro lado, al no existir un análisis de inventario del Fityre, se elaboró un diagrama de flujo donde se identifican todas las materias primas y procesos involucrados en la preparación del Fityre para uso en mezclas asfálticas (Figura 22). El proceso de fabricación de Fityre comienza con la mezcla de fibras textiles desagregadas de NFU con la emulsión asfáltica diluida en una relación de peso de 1:2. Luego, las fibras textiles de la mezcla NFU-emulsión asfáltica se secan para eliminar el agua a pelletizar. Finalmente, los gránulos se mezclan con polvo de caucho en una proporción de peso de 20:1. La composición del peso final del aditivo Fityre son fibras textiles compuestas por NFU 58%, aglomerante asfáltico 37% y caucho en polvo 5% [50]. Las entradas y salidas se ingresaron en SimaPro para cuantificar las cargas ambientales asociadas a una unidad de masa (1000 g).

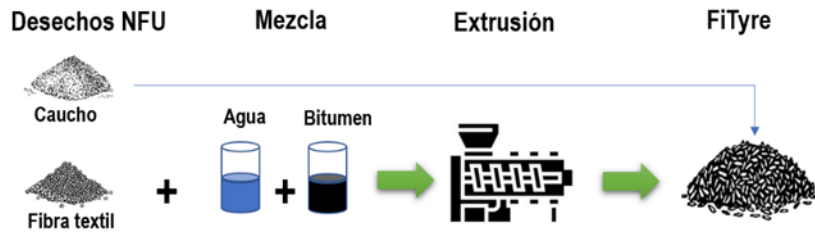


Figura 22. Proceso de fabricación del pellet de fibra a partir de neumáticos fuera de uso (Fityre) para ser añadido a las mezclas asfálticas. Basado en [51].

Para obtener resultados comparativos objetivos, en este proyecto se utilizó el método de evaluación de impacto ReCiPe porque tiene una mayor cantidad de categorías en el punto medio y estas categorías se pueden agrupar en tres categorías de punto final: daño a la salud humana, daño a la diversidad del ecosistema y daño a la disponibilidad de recursos, obteniéndose de esta manera una evaluación más global de los impactos ambientales. La metodología ReCiPe también permite realizar evaluaciones considerando hasta 18 categorías de impacto de punto medio. Los resultados obtenidos muestran que hay categorías de impacto en las cuales no se registran mayores impactos ambientales entre los distintos tipos de fibras. Por esta razón en la Tabla 8 se destacan los resultados de las categorías de impacto donde haya resultados significativos en el medioambiente (cambio climático y acidificación de los suelos, marcados en azul en Tabla 8), afectan la salud humana (toxicidad humana y emisiones de material particulado, marcados en verde en Tabla 8) y el agotamiento recursos fósiles no renovables (línea gris en Tabla 8) comparando las distintas fibras usadas en HMA. Los resultados de las cargas ambientales para las distintas proporciones de Fityre tipo 2, se muestran en la Figura 23 y la Figura 24.

En general los resultados muestran que en todas las categorías consideradas para la comparación las cargas ambientales son mucho menores cuando se utiliza Fityre. Esto es especialmente evidente en las mezclas SMA donde se ve una diferencia lineal en directa proporción al uso de FCP y/o Fityre. Estos resultados eran previsible principalmente debido a que en todas las fibras (exceptuando Fityre) se utilizan recursos primarios vírgenes y a su vez están asociados a procesos de fabricación en el cual hay emisiones de contaminantes al medio ambiente. En cambio, en Fityre, se reutiliza un material de desecho no considerado hasta ahora para su reutilización (FTNFU). En la modelación de Fityre en SimaPro se observa que las mayores cargas ambientales provienen del uso de bitumen para elaborar el pellet en el que se integra la fibra a fin de mejorar la distribución de las fibras en la mezcla asfáltica.

Tabla 8. Resultados obtenidos en cada categoría de impacto para cada dosificación de fibras utilizadas en las mezclas asfálticas.

Categorías	Unidad	Fibras utilizadas en HMA			
		Fityre 1	Fibra de vidrio	Fibra de Poliéster	Fibra de aramida
Cambio climático	kg CO ₂ eq	1,610	2,610	4,420	6,105
Agotamiento de Ozono	kg CFC-11 eq	0,000	0,000	0,000	0,000
Acidificación de Suelos	kg SO ₂ eq	0,010	0,018	0,034	0,019
Eutrofización de las aguas	kg P eq	0,000	0,001	0,001	0,000
Eutrofización marina	kg N eq	0,002	0,004	0,013	0,001
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	0,382	2,290	1,600	1,645
Oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	0,144	0,012	0,017	0,017
Material particulado	kg PM10 eq	0,004	0,007	0,010	0,006
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,000	0,000	0,004	0,000
Ecotoxicidad acuática	kg 1,4-DB eq	0,016	0,026	0,078	0,001
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	0,014	0,024	0,067	0,002
Radiación ionizante	kBq U235 eq	0,409	0,393	0,610	0,413
Ocupación suelos agrícolas	m ² a	0,309	0,073	1,540	0,005
Ocupación suelos urbanos	m ² a	0,015	0,022	0,063	0,000
Transformación suelos naturales	m ²	0,002	0,000	0,002	0,000
Agotamiento de metales	kg Fe eq	0,064	0,037	0,025	0,039
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	0,021	0,195	0,289	2,134

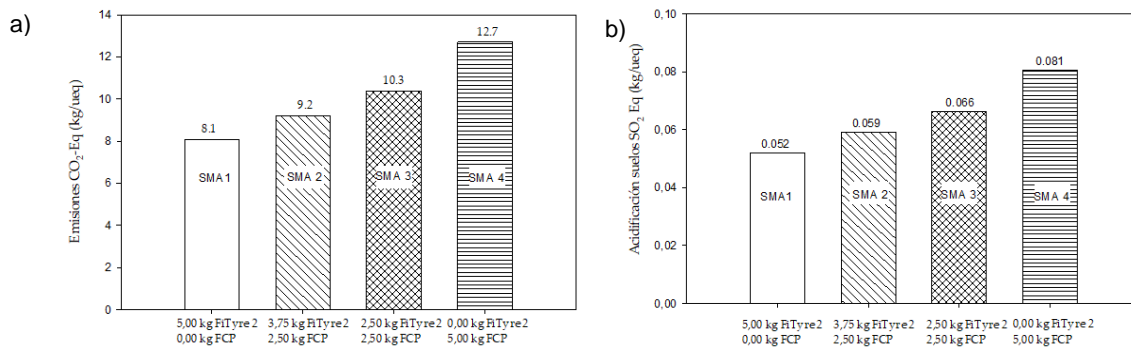


Figura 23. Impacto en categoría de (a) cambio climático y (b) de acidificación de los suelos utilizando ReCiPe midpoint (H) method (V1.11/Europe ReCiPe H).

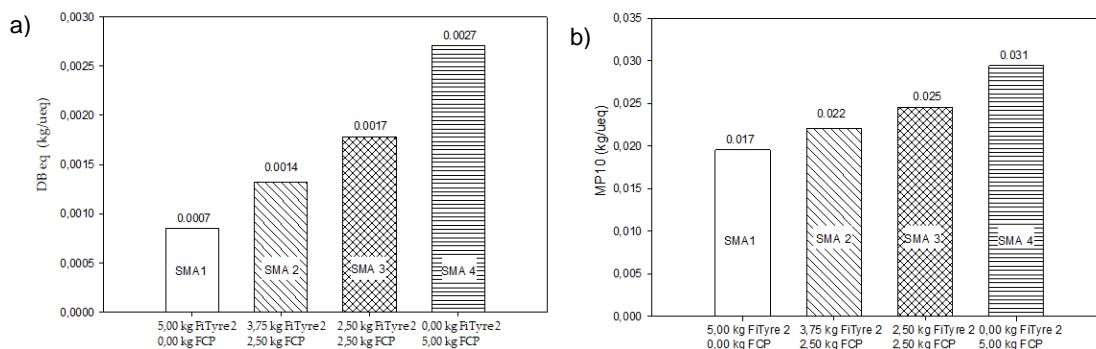


Figura 24. Impacto en categoría de (a) toxicidad humana y (b) de emisión de material particulado utilizando ReCiPe midpoint (H) method (V1.11/Europe ReCiPe H).

➤ **CONTRIBUCIÓN A LA SOSTENIBILIDAD SOCIAL DE ADITIVOS ASFÁLTICOS INNOVADOS A PARTIR DE FIBRA TEXTIL DE NEUMÁTICO FUERA DE USO**

La fibra textil de neumático fuera de uso (FTNFU) es un residuo del proceso de reciclaje de los neumáticos. Actualmente, se encuentra en desarrollo un aditivo en base a este residuo para ser usado en mezclas asfálticas en caliente y mezclas SMA. Este producto busca ser sostenible ambiental y socialmente. En esta parte de la investigación se ha planteado como objetivo “Evaluar la contribución a la sostenibilidad social de estos aditivos asfálticos innovados a partir de fibra textil de neumático fuera de uso”.

El desarrollo de un aditivo con estas características toma mayor importancia, ya que en Chile se generan cerca de 140.000 toneladas de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) [52]. Además, el Gobierno de Chile ha definido metas y plazos para dar un tratamiento ambientalmente amigable a los NFU [53], lo que implica un desafío dada la gran cantidad de FTNFU provistas como residuo. En este contexto, el reciclaje de fibras para ser usadas en mezclas asfálticas ha sido investigado por diversos autores [54–56]. Ahora, tomando en cuenta la problemática de la FTNFU y que los desafíos nacionales buscan aumentar la cantidad de neumáticos reciclados, se hace sumamente importante buscar una salida a este desecho. En efecto, se ha investigado el uso de residuos en mezclas asfálticas, tomando en cuenta aspectos técnicos, económicos y ambientales. Sin embargo, las publicaciones investigadas sobre la sostenibilidad social en aditivos para mezclas asfálticas son limitadas. Esto contrasta con la necesidad de proveer un productor realmente sostenible, en que la dimensión social no puede quedar fuera.

De esta forma, siguiendo un enfoque multicriterio para abordar la contribución social de estos materiales innovados se ha propuesto identificar los criterios e indicadores sociales diferenciadores entre el impacto de los aditivos asfálticos innovados y aquellos en uso; en consideración a las etapas de extracción y producción. Con ello, es factible emprender en la construcción de un modelo de medición de la contribución social para aditivos asfálticos innovados y en uso. Esto permitiría, comparar la contribución social de los aditivos dentro de un contexto nacional.

En esta investigación se desarrolló a través de tres etapas consecutiva tal como se ilustra en la Figura 25. En una primera etapa se aplica una Triangulación de la información [57] obtenida desde publicaciones científicas, documentos técnicos y la aplicación de entrevistas semiestructuradas a expertos. En una segunda etapa se aplica un Mapa Cognitivo Difuso (MCD) que determina el modelo de evaluación. Esta es una técnica computacional blanda que combina la lógica difusa y las redes neuronales [58]. Es una herramienta con numerosas ventajas comparativas, como por ejemplo simplificar un entorno de decisión complejo al tiempo que integra las diferentes perspectivas e ideas de los actores mediante un enfoque semicuantitativo [59]. Además, este método permite lidiar con la complejidad, con la información vaga y con características de incertidumbre. En este punto se realizan dos análisis sobre el MCD. El primero es el análisis estático, que determina los comportamientos estratégicos influyentes de cada indicador de contribución social del MCD y/o la selección de los conceptos en que se va a intervenir. El segundo, es un análisis dinámico que brinda información sobre las relaciones entre los conceptos y su efecto de largo plazo [60]. En una tercera etapa se aplica el modelo de evaluación para evaluar los aditivos innovados y en uso a través de un método de decisión

multicriterio de ponderación aditiva simple (SAW). El SAW es una técnica de decisión multicriterio que se basa en el promedio ponderado, y se utiliza muy a menudo en métodos de decisión con un número finito y discreto de alternativas de decisión. La ventaja de este método es que corresponde a una transformación lineal proporcional de los datos en bruto, lo cual significa que el orden relativo de magnitud de las ponderaciones estandarizadas no cambia [61].

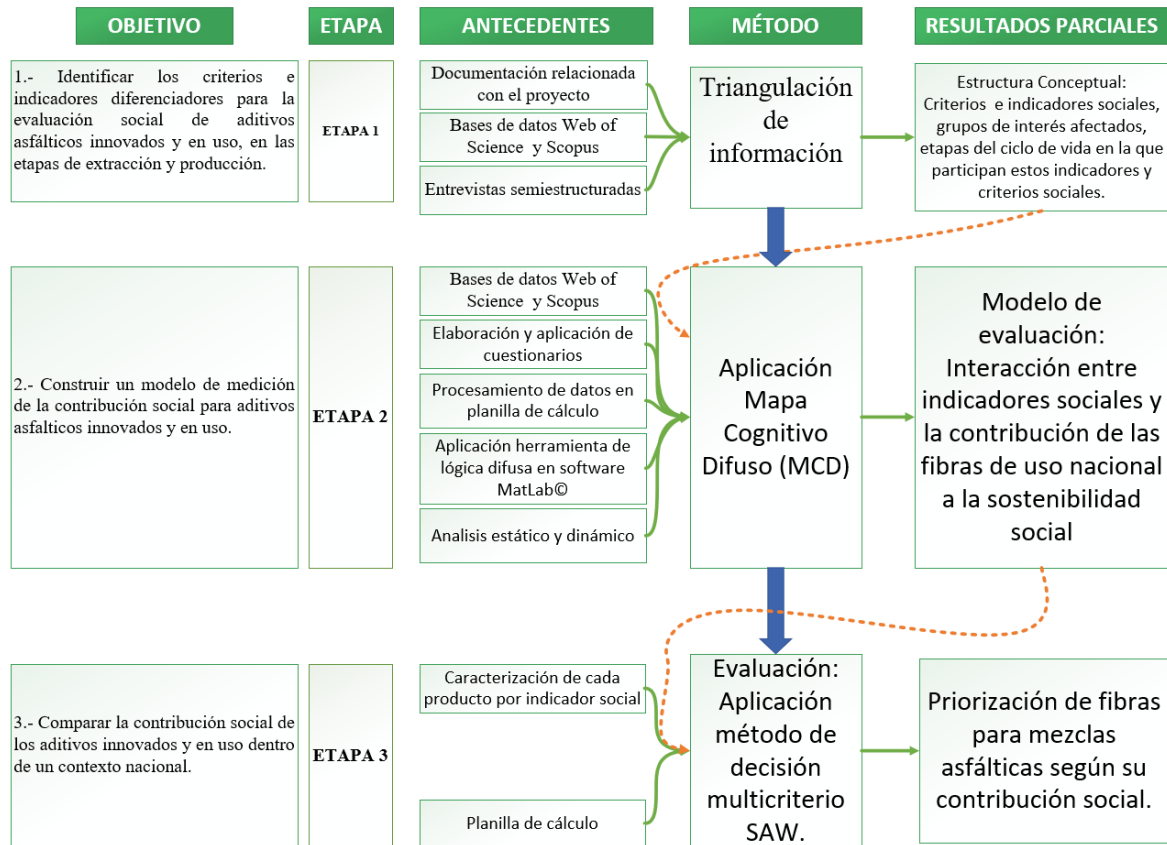


Figura 25. Proceso metodológico para determinar la contribución social de mezclas asfálticas.

Tras la aplicación de la primera etapa se obtuvieron siete criterios y 16 indicadores sociales, asociados a seis grupos de interés relacionados a las etapas de ciclo de vida de Extracción, Producción de aditivo y Producción de mezcla (Tabla 9). Estos elementos constituyen la estructura conceptual del modelo de evaluación de aditivos asfálticos. A partir de la segunda etapa y la aplicación de un análisis estático se identifican los indicadores estratégicos de mayor relevancia dentro de la estructura de evaluación. En la Figura 26 se muestra el resultado de los análisis estáticos de los indicadores numerados en correspondencia con la identificación de la Tabla 9. De esta forma, “Interés de los consumidores”, “Innovación y desarrollo”, “Ampliación de la vida útil” y la “Transferencia del conocimiento” se enmarcan en el cuadrante Z1 que recoge a los indicadores que reciben y aportan el mayor impacto del sistema; aunque están condicionado por la influencia de otros. En efecto, estratégicamente presentan una mayor importancia los indicadores del cuadrante Z4 “Aporte técnico”, “Cantidad de aditivo necesario” y “Certificaciones”, que son fáciles de intervenir (tienen un menor impacto del resto) a la vez que influyen significativamente en el resto del sistema. El resto de los indicadores presentan un menor impacto sobre el sistema de evaluación.

Por su parte, a partir de un análisis dinámico que considera la relación de los indicadores y su efecto de largo plazo tras reiterar ciclos de iteraciones sobre el modelo del Mapa Cognitivo Difuso (MCD) de la Figura 27. A partir de los análisis estático y dinámico surgen los pesos de importancia de corto plazo (estático) y largo plazo (dinámico) sobre cada uno de los indicadores. Estos pesos permiten la evaluación de cada uno de los productos evaluados en la etapa tres.

Tabla 9. Criterios e indicadores sociales diferenciadores y grupos de interés en el ciclo de vida de aditivos asfálticos innovados y en uso.

CRITERIO	INDICADOR	ETAPA DEL CICLO DE VIDA / GRUPO DE INTERES ¹		
		Extracción	Producción Aditivo	Producción de mezcla
Revalorización	1.- Costo del aditivo por tonelada de mezcla		Inv, Pr.Ad, Pr.MA	Inv, Pr.Ad., Pr.MA
	2.- Ampliación de la vida útil de un producto reutilizado	Rec, Inv, Prod.Ad, Reg.	Inv, Pr.Ad., Reg	
	3.- Aporte técnico sobre los aditivos existentes			Inv, Pr.Ad., Pr.MA, Cons, Reg
	4.- Puestos de trabajo nacional	Rec, Inv, Pr.Ad.	Inv, Pr.Ad., Pr.MA	
Impacto en salud	5.- Reducción de riesgo de incendio en vertedero	Rec, Inv, Pr.Ad., Reg		
	6.- Reducción del área de ocupación de suelo	Rec, Inv, Pr.Ad., Reg		
	7.- Cantidad de aditivo necesario	Rec, Inv, Pr.Ad., Reg	Inv, Pr.Ad., Pr.MA, Cons, Reg	Inv, Pr.Ad., Pr.MA, Cons
	8.- Permanencia en botadero	Rec, Inv, Pr.Ad., Reg		
Gasto social	1.- Costo del aditivo por tonelada de mezcla		Inv, Pr.Ad., Pr.MA	Inv, Pr.Ad., Pr.MA, Cons
Impacto mediático y concientización pública	9.- Grado de recepción por parte de los consumidores		Investigadores, Productor de Ad.	Productor MA, Consumidor
	10.- Se enmarca dentro de la Ley REP y políticas públicas del Ministerio del Medio Ambiente	Rec, Inv, Prod.Ad., Reg	Prod.Ad., Reg	
Innovación y desarrollo	11.- Innovación y desarrollo patentado en la industria nacional	Rec, Inv	Inv, Pr.Ad., Pr.MA, Cons	
	12.- Transferencia de conocimiento	Rec, Inv	Inv, Pr.Ad., Pr.MA, Cons	
Condiciones para el uso del producto	13.- Interés de productores			Inv, Pr.Ad., Pr.MA, Cons
	14.- Certificaciones		Inv, Pr.Ad., Pr.MA, Cons, Reg	Inv, Pr.Ad., Pr.MA, Cons, Reg
	15.- Oferta actual de fibra	Rec, Inv, Pr.Ad., Pr.MA, Reg, Cons	Inv, Pr.Ad., Pr.MA, Cons, Reg	
	16.- Interés de consumidores			Inv, Pr.Ad., Pr.MA
Políticas públicas del MMA	10.- Se enmarca dentro de la Ley REP y políticas públicas del Ministerio del Medio Ambiente	Rec, Inv, Pr.Ad., Reg	Pr.Ad., Reg	

(1) Grupos de interés: Investigador (Inv), Productor de aditivo (Pr.Ad), Productor de Mezcla Asfáltica (Pr.MA), Reciclador (Rec), Regulador (Reg), Consumidor (Cons).

En la etapa tres se evalúan dos casos estudios. El caso de estudios 1 compara el rendimiento social de aditivos asfálticos para mezclas asfálticas en caliente (HMA). El caso de estudios 2 comparar el rendimiento social de aditivos asfálticos para mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA). En el caso de estudios 1 se consideran los productos de mayor uso en el mercado nacional (Fibras de Vidrio, de Poliéster, y de Aramida) y un aditivo innovado en base a FTNFU denominada Fityre tipo 1. En el caso de estudio 2 (SMA) se consideran el aporte de la fibra de celulosa y de tres proporciones de FTNFU denominada Fityre tipo 2 al 100%, 75% y 50%. De acuerdo con los resultados de la Figura 28 el

rendimiento social de la evaluación de las fibras para la HMA y SMA, determinó que el mejor desempeño en una situación actual (estático) y a largo plazo (dinámico) es el aditivo en desarrollo llamado Fityre tipo 1 y 2, respectivamente. En el caso de SMA cuanto mayor es la proporción de aditivo en base a FTNFU mayor es el aporte social. En adición, en ambos casos el efecto en las etapas más tempranas del ciclo de vida tiende a destacar el aporte del Fityre y la proporción de FTNFU por sobre las etapas más tardías y el resto de los aditivos. Los indicadores que destacan al aditivo innovado son el “Interés de los consumidores”, la “Innovación y desarrollo patentado en la industria nacional” y la “Ampliación de la vida útil de un producto reutilizado”. Aun son necesarias algunas brechas por alcanzar como son las “Certificaciones” y la confianza de los productores respecto de su “Aporte técnico”.

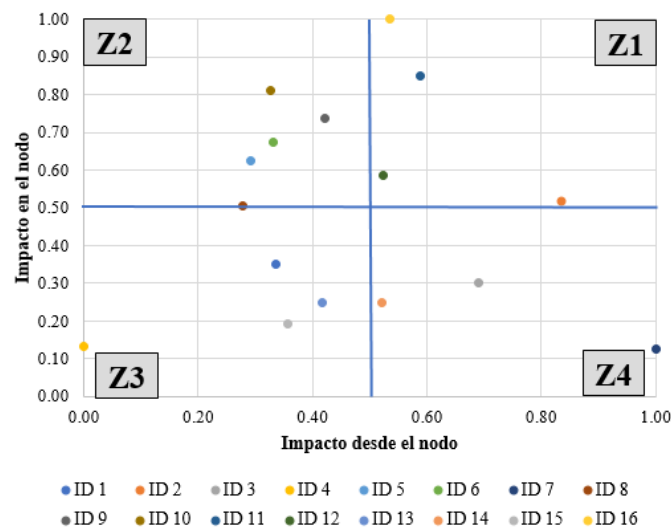


Figura 26. Análisis estáticos del MCD de la estructura de evaluación.

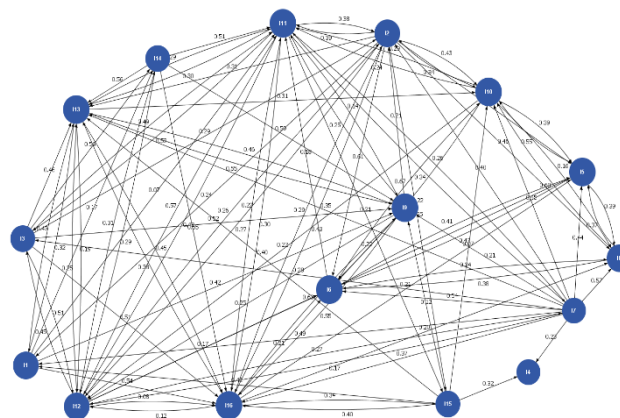


Figura 27. Modelo de evaluación del aporte social de aditivos asfálticos innovados y en uso a partir de un MCD.

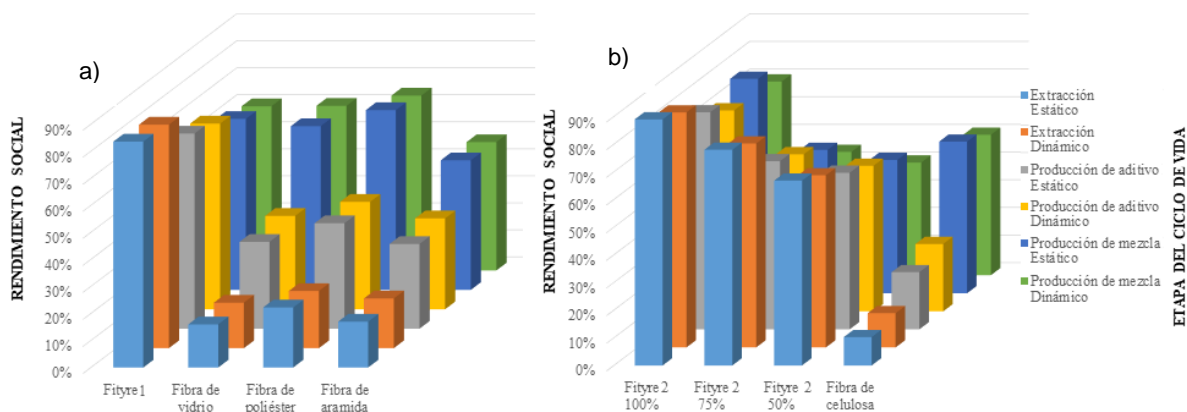


Figura 28. Contribución social de aditivos asfáltico innovados y en uso para (a) HMA y (b) SMA.

CONCLUSIONES

Etapa 1:

- Para la fabricación del aditivo Fityre, se seleccionó la fibra con gránulos de caucho, debido a que presentaba un mejor comportamiento al quiebre de la emulsión y representa un 90% de las fibras textiles residuales del proceso de reciclaje de NFU.
- De acuerdo con los análisis fisicoquímicos se determinó que el principal componente de las fibras textiles de NFU fue poliéster.
- Se utilizó una relación en peso 1:1:1 (fibra-emulsión asfáltica quiebre rápido-agua) para la fabricación de la materia prima de Fityre.
- Se debe realizar una adición de caucho fino de un 4,8% p/p como material antiadherente y para obtener una buena estabilidad al almacenamiento del Fityre.
- En el contexto que la FTNFU se considera actualmente un subproducto masivo de la industria de reciclaje de los NFU, se logra desarrollar por medio de una fabricación manual un aditivo en base a FTNFU (Fityre) con las propiedades adecuadas uso en mezclas asfálticas.

Etapa 2:

- Se seleccionó una mezcla de referencia densa tipo IV-12 con un contenido óptimo de cemento asfáltico (CA) de 5,3%.
- Se seleccionaron los contenidos de Fityre de 2%, 5% y 8% sobre el peso del CA para evaluar los parámetros de diseño, los cuales se cumplieron adecuadamente, de acuerdo con la normativa chilena vigente.
- Para un uso de hasta un 5% de Fityre se observa un incremento del módulo de rigidez de la mezcla. Para un porcentaje mayor, su aporte no es significativo en relación con la mezcla de referencia.
- Las mezclas con el aditivo Fityre obtuvieron un buen desempeño en el ensayo de sensibilidad al agua, mostrando valores de ITSR superiores a la mezcla de referencia.

- Las resistencias a la fisuración térmica de las mezclas que utilizaron Fityre a 10 °C muestran que se requiere más trabajo para producir la fisuración (GD) y registran una mayor tenacidad (TI). Sin embargo, a 0 °C, las mezclas muestran una mayor rigidez y presentan mayores valores en la resistencia máxima (Fmáx) pero menores niveles de capacidad de flexión (d50PM).
- La resistencia a la deformación permanente muestra que el uso del aditivo Fityre tiene un efecto significativo en el parámetro de ahuellamiento (RD), con reducciones entre 30% y 37% en comparación con la mezcla de referencia, y con menor WTS. Además, ninguna de las mezclas evaluadas presentó stripping.
- Para el uso de Fityre se requiere una mayor energía de compactación para alcanzar los mismos niveles de densificación que la mezcla de referencia. Esto se evidencia en mezclas compactadas a través del Compactador Giratorio al aplicar igual energía de compactación (ensayo de susceptibilidad a la humedad) y cuando se requiere igual porcentaje de vacíos (ensayo de ahuellamiento).
- El aditivo Fityre permite mejorar las propiedades de desempeño de la mezcla asfáltica. Los mayores efectos se produjeron en las propiedades de resistencia al ahuellamiento, módulo de rigidez y daño por humedad.

Etapas 3:

- Las propiedades volumétricas de la mezcla SMA con 100% de reemplazo del pellet comercial de celulosa por Fityre no presenta diferencias significativas comparada con la mezcla de referencia.
- La mezcla SMA con 100% de reemplazo del pellet comercial de celulosa por Fityre cumple los parámetros de escurrimiento, Marshall y Superpave exigidos por la normativa chilena.
- La mezcla SMA con 100% de reemplazo del pellet comercial de celulosa por Fityre presentó similar módulo de rigidez en relación a la mezcla de referencia.
- Los valores obtenidos en los parámetros de fisuración térmica son similares a los obtenidos por la mezcla de referencia.
- Todas las mezclas evaluadas obtuvieron valores de ITSR del 100% y registraron similares valores de ITSd e ITSw, mostrando un muy buen desempeño al daño por humedad.
- El reemplazo total del pellet de celulosa por el aditivo Fityre no presentó cambios tanto en el diseño como desempeño de la mezcla SMA, lográndose utilizar un producto en base a un residuo masivo de los NFU que mantiene las propiedades de la mezcla y contribuye al medio ambiente.

Etapas 4:

- El equipo extrusor ha evolucionado desde una máquina de tecnología básica a un diseño que otorga mayor capacidad de producción y minimiza las desviaciones de calidad del producto.
- El parámetro densidad evidencia la similitud de los pellets obtenidos de forma mecanizada con aquellos producidos inicialmente de manera manual, por lo que se comprueba la efectividad

del equipo extrusor fabricado en reproducir los pellets de aditivo de acuerdo con las características definidas inicialmente.

- El producto obtenido en el equipo extrusor 3 reúne las características técnicas requeridas para producir de Fityre tipo 1 para mezclas HMA y Fityre tipo 2 para mezclas SMA, disminuyendo su variabilidad, lo que incide en una menor incertidumbre de los pellets obtenidos.

Etapa 5:

- La incorporación del aditivo Fityre tipo 1 en las mezclas convencionales (HMA) y Fityre tipo 2 en mezclas tipo SMA otorga una mayor resistencia al daño por fatiga (duplica vida a fatiga).
- Los resultados obtenidos en el módulo de rigidez en mezclas HMA muestran que la incorporación de Fityre tipo 1 aumenta la capacidad estructural.
- El reemplazo del pellet de celulosa por el aditivo FiTyre tipo 2 mantiene los valores en el módulo de rigidez de las mezclas SMA evaluadas.
- El uso de Fityre en ambos formatos, para las mezclas convencionales HMA y para las mezclas tipo SMA, mejora el desempeño a fatiga, otorgando de mayor durabilidad a las mezclas evaluadas.

Etapa 6:

- Los resultados de este estudio muestran que en las comparaciones de las mezclas HMA en la categoría de cambio climático, el uso de FiTyre permite reducir en hasta 4 veces menos emisiones de CO₂-eq (1,6 kg) en comparación con fibra de aramida (6,1 kgCO₂-eq) que es la fibra con mayores emisiones por unidad equivalente. Esta misma diferencia es posible de observar en la categoría acidificación de los suelos; si se usa FiTyre (0,010 Kg SO₂-eq), se reduce en 3,4 veces el impacto en comparación al uso de fibras de poliéster (0,034Kg SO₂-eq). En general en cada una de las categorías en que se han comparado las fibras los menores impactos ambientales se derivan del uso de Fityre.
- Cuando se comparan las distintas mezclas SMA con sus diversas proporciones, ya sea de Fityre o Fibra de celulosa pelletizada premezclada con asfalto (FCP), se observa que de forma lineal siempre las menores cargas ambientales se obtienen usando mayor proporción de Fityre. Por ejemplo, en la categoría de agotamiento de recursos fósiles se observa que con el uso solo de Fityre se generan 139 gramos menos de MP en comparación con la variante en que solo se utiliza FCP. Por otro lado, en la categoría de toxicidad humana se observa que mediante el uso solo de Fityre se generan 1,8 veces menos emisiones de 1,4DB-eq (1,9) en comparación con el uso exclusivo de FCP (3,4). De esto se concluye que, desde la perspectiva de la sustentabilidad ambiental, es más ventajoso el uso de Fityre en comparación con las fibras tradicionales existentes (fibra de vidrio, la fibra de poliéster y la fibra de aramida).
- Se propone un modelo conceptual de evaluación de la contribución social de aditivos asfálticos innovados y en uso dentro del contexto chileno compuesto por 16 indicadores que consideran los criterios de revalorización del producto, el impacto en la salud, el gasto social, la concientización pública, la innovación y desarrollo, las condiciones de uso y las políticas

medioambientales vigentes en el ciclo de vida de extracción, producción del aditivo y producción de la mezcla asfáltica.

- En la mayoría de los criterios el aporte social reflejado en las mezclas HMA y SMA brinda al aditivo Fityre tipo 1 y 2 un mejor rendimiento cuanto mayor es la inclusión de FTNFU. Sin embargo, para el criterio “Condiciones para el uso del producto” aún se requiere una mejora en de este indicador. En este punto la necesidad de certificación justifica la brecha por mejorar.
- Por otro lado, el indicador “Interés de consumidores” es el que presenta mayor relevancia en la actualidad, a corto y largo plazo. La razón de esto es que este indicador es altamente impactado por los demás. Sin embargo, cualquier intervención que busque una mejora para este indicador será muy difícil de lograr. De la misma manera, el indicador “Puestos de trabajo nacional” se mantiene como el menos relevante. La razón de esto es que es impactado directamente solo por dos indicadores (Cantidad de fibra necesaria y Oferta actual de fibra). Mejorar este indicador es fácil, debido a que posee un bajo grado de impacto por otros indicadores. Sin embargo, esta mejora no implicaría mejoras significativas para la sostenibilidad social del producto, ya que no impacta a otros indicadores.
- En adición a partir de los resultados el “Interés de los consumidores”, la “Innovación y desarrollo”, “Ampliación de la vida útil” y la “Transferencia del conocimiento” son los indicadores que reciben y aportan el mayor impacto del sistema; aunque están fuertemente condicionado por la influencia de otros. De otro modo los indicadores “Aporte técnico”, “Cantidad de aditivo necesario” y “Certificaciones” presentan una importancia estratégica debido a que tienen un menor impacto del resto, lo que los hace más controlables, a la vez que influyen significativamente en el aporte social de los aditivos evaluados

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento recibido por el gobierno de Chile a través del programa Fondef/IDEA de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), que permitieron el desarrollo del proyecto de investigación N° ID20110160.

Los autores agradecen a las entidades asociadas e interesadas que participaron del proyecto.

Entidades asociadas: Universidad de La Frontera, Polambiente, Bitumix e Isa Intervial.

Entidades interesadas: Comité del Asfalto, Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G., Chile Neumáticos A.G., Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción, Ministerio del Medio Ambiente y Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas.

Finalmente, los autores extienden este agradecimiento a Patricia Aros, Daniel Oliva y a todos los alumnos tesis de la Universidad de La Frontera que participaron en actividades de este proyecto.

REFERENCIAS

1. Martínez, J.D. An overview of the end-of-life tires status in some Latin American countries: Proposing pyrolysis for a circular economy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *144*, 111032, doi:10.1016/j.rser.2021.111032.
2. Araujo-Morera, J.; Verdejo, R.; López-Manchado, M.A.; Hernández Santana, M. Sustainable mobility: The route of tires through the circular economy model. *Waste Manag.* **2021**, *126*, 309–322, doi:10.1016/j.wasman.2021.03.025.
3. Narani, S.S.; Abbaspour, M.; Mir Mohammad Hosseini, S.M.; Aflaki, E.; Moghadas Nejad, F. Sustainable reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTFs) as reinforcement materials for expansive soils: With a special focus on landfill liners/covers. *J. Clean. Prod.* **2020**, *247*, doi:10.1016/j.jclepro.2019.119151.
4. Valipour, M.; Shourijeh, P.T.; Mohammadinia, A. Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement. *Transp. Geotech.* **2021**, *27*, 100474, doi:10.1016/j.trgeo.2020.100474.
5. Bocci, E.; Prospero, E. Recycling of reclaimed fibers from end-of-life tires in hot mix asphalt. *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)* **2020**, *7*, 678–687, doi:10.1016/j.jtte.2019.09.006.
6. Landi, D.; Vitali, S.; Germani, M. Environmental Analysis of Different End of Life Scenarios of Tires Textile Fibers. *Procedia CIRP* **2016**, *48*, 508–513, doi:10.1016/j.procir.2016.03.141.
7. Xu, X.; Leng, Z.; Lan, J.; Wang, W.; Yu, J.; Bai, Y.; Sreeram, A.; Hu, J. Sustainable Practice in Pavement Engineering through Value-Added Collective Recycling of Waste Plastic and Waste Tyre Rubber. *Engineering* **2021**, *7*, 857–867, doi:10.1016/j.eng.2020.08.020.
8. Jimenez-Espadafor, F.J.; Becerra Villanueva, J.A.; García, M.T.; Trujillo, E.C.; Blanco, A.M. Optimal design of acoustic material from tire fluff. *Mater. Des.* **2011**, *32*, 3608–3616, doi:10.1016/j.matdes.2011.02.024.
9. Marconi, M.; Landi, D.; Meo, I.; Germani, M. Reuse of Tires Textile Fibers in Plastic Compounds: Is this Scenario Environmentally Sustainable? *Procedia CIRP* **2018**, *69*, 944–949, doi:10.1016/j.procir.2017.11.074.
10. Landi, D.; Gigli, S.; Germani, M.; Marconi, M. Investigating the feasibility of a reuse scenario for textile fibres recovered from end-of-life tyres. *Waste Manag.* **2018**, *75*, 187–204, doi:10.1016/j.wasman.2018.02.018.
11. Thai, Q.B.; Le-Cao, K.; Nguyen, P.T.T.; Le, P.K.; Phan-Thien, N.; Duong, H.M. Fabrication and optimization of multifunctional nanoporous aerogels using recycled textile fibers from car tire wastes for oil-spill cleaning, heat-insulating and sound absorbing applications. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* **2021**, *628*, 127363, doi:10.1016/j.colsurfa.2021.127363.
12. Zare, P.; Sheikhi Narani, S.; Abbaspour, M.; Fahimifar, A.; Mir Mohammad Hosseini, S.M.; Zare, P. Experimental investigation of non-stabilized and cement-stabilized rammed earth reinforcement by Waste Tire Textile Fibers (WTTFs). *Constr. Build. Mater.* **2020**, *260*, 120432, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120432.
13. Norambuena-Contreras, J.; Serpell, R.; Valdés Vidal, G.; González, A.; Schlangen, E. Effect of fibres addition on the physical and mechanical properties of asphalt mixtures with crack-healing purposes by microwave radiation. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *127*, 369–382, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.005.
14. Mohammed, M.; Parry, T.; Thom, N.; Grenfell, J. Microstructure and mechanical properties of fibre reinforced asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *240*, 117932, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117932.
15. Koçkal, N.U.; Köfteci, S. Aggressive Environmental Effect on Polypropylene Fibre Reinforced Hot Mix Asphalt. *Procedia Eng.* **2016**, *161*, 963–969, doi:10.1016/j.proeng.2016.08.834.
16. Tapkin, S. The effect of polypropylene fibers on asphalt performance. *Build. Environ.* **2008**, *43*, 1065–1071, doi:10.1016/j.buildenv.2007.02.011.

17. Kim, M.; Kim, S.; Yoo, D.; Shin, H. Enhancing mechanical properties of asphalt concrete using synthetic fibers. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *178*, 233–243, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.070.
18. Taherkhani, H. Investigating the Effects of Nanoclay and Nylon Fibers on the Mechanical Properties of Asphalt Concrete. *Civ. Eng. Infrastructures J.* **2017**, *49*, 235–249, doi:10.7508/ceij.2016.02.004.
19. Ziari, H.; Aliha, M.R.M.; Moniri, A.; Saghafi, Y. Crack resistance of hot mix asphalt containing different percentages of reclaimed asphalt pavement and glass fiber. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *230*, 117015, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117015.
20. Gupta, A.; Castro-Fresno, D.; Lastra-Gonzalez, P.; Rodriguez-Hernandez, J. Selection of fibers to improve porous asphalt mixtures using multi-criteria analysis. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *266*, 121198, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121198.
21. Xing, X.; Liu, T.; Pei, J.; Huang, J.; Li, R.; Zhang, J.; Tian, Y. Effect of fiber length and surface treatment on the performance of fiber-modified binder. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *248*, 118702, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118702.
22. Li, Z.; Shen, A.; Wang, H.; Guo, Y.; Wu, H. Effect of basalt fiber on the low-temperature performance of an asphalt mixture in a heavily frozen area. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *253*, 119080, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119080.
23. Davar, A.; Tanzadeh, J.; Fadaee, O. Experimental evaluation of the basalt fibers and diatomite powder compound on enhanced fatigue life and tensile strength of hot mix asphalt at low temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *153*, 238–246, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.175.
24. Dehghan, Z.; Modarres, A. Evaluating the fatigue properties of hot mix asphalt reinforced by recycled PET fibers using 4-point bending test. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *139*, 384–393, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.082.
25. Hong, R. bao; Wu, J. rong; Cai, H. bing Low-temperature crack resistance of coal gangue powder and polyester fibre asphalt mixture. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *238*, 117678, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117678.
26. Qian, S.; Ma, H.; Feng, J.; Yang, R.; Huang, X. Fiber reinforcing effect on asphalt binder under low temperature. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *61*, 120–124, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.035.
27. Landi, D.; Marconi, M.; Meo, I.; Germani, M. Reuse scenarios of tires textile fibers: An environmental evaluation. *Procedia Manuf.* **2018**, *21*, 329–336, doi:10.1016/j.promfg.2018.02.128.
28. Acevedo, B.; Fernández, A.M.; Barriocanal, C. Identification of polymers in waste tyre reinforcing fibre by thermal analysis and pyrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2015**, *111*, 224–232, doi:10.1016/j.jaap.2014.11.005.
29. Castelvetro, V.; Corti, A.; Bianchi, S.; Giacomelli, G.; Manariti, A.; Vinciguerra, V. Microplastics in fish meal: Contamination level analyzed by polymer type, including polyester (PET), polyolefins, and polystyrene. *Environ. Pollut.* **2021**, *273*, 115792, doi:10.1016/j.envpol.2020.115792.
30. Majumdar, A.; Shukla, S.; Singh, A.A.; Arora, S. Circular fashion: Properties of fabrics made from mechanically recycled poly-ethylene terephthalate (PET) bottles. *Resour. Conserv. Recycl.* **2020**, *161*, 104915, doi:10.1016/j.resconrec.2020.104915.
31. Rwei, S.P.; Ranganathan, P.; Lee, Y.H. Synthesis and characterization of low melting point PA6 copolyamides from ϵ -caprolactam with bio-based polyamide salt. *J. Mol. Struct.* **2019**, *1186*, 285–292, doi:10.1016/j.molstruc.2019.03.044.
32. Dirección de Vialidad de Chile. Volumen 8. Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control. In *Manual de Carreteras*; Ministerio de Obras Publicas de Chile, Ed.; Ministerio de Obras Públicas: Santiago de Chile, 2021.

33. Dirección de Vialidad de Chile. Volumen 8. Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control. In *Manual de Carreteras*; Ministerio de Obras Publicas de Chile, Ed.; Ministerio de Obras Públicas: Santiago de Chile, 2022.
34. Ministerio de Vivienda y Urbanización *Códigos de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación*; 2018;
35. Qian, G.; Shi, C.; Yu, H.; Yao, D.; Zhu, X.; Li, X. Evaluation of different modulus input on the mechanical responses of asphalt pavement based on field measurements. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *312*, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125299.
36. Slebi-Acevedo, C.J.; Lastra-González, P.; Pascual-Muñoz, P.; Castro-Fresno, D. Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: A review. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *200*, 756–769, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.171.
37. Calabi, A.; Valdés, G.; Sanchez, E.; Mardones, L.; Rosas, J. Evaluación de la incorporación de fibra textil proveniente de neumático fuera de uso (NFU) en las propiedades del ligante asfáltico. In Proceedings of the XX CILA. Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto.; Guadalajara, Mexico, 2019.
38. Chen, J.S.; Lin, K.Y.I. Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers. *J. Mater. Sci.* **2005**, *40*, 87–95, doi:10.1007/s10853-005-5691-4.
39. Slebi-Acevedo, C.J.; Lastra-González, P.; Indacochea-Vega, I.; Castro-Fresno, D. Laboratory assessment of porous asphalt mixtures reinforced with synthetic fibers. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *234*, 117224, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117224.
40. Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Rubio-Gámez, M.C. Reuse of deconstructed tires as anti-reflective cracking mat systems in asphalt pavements. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *53*, 182–189, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.101.
41. Dirección General de Carreteras *PG-3 Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*; Centro de.; 2015;
42. Miró, R.; Martínez, A.; Pérez-Jiménez, F.; Botella, R.; Valdés, G. *Assessment of cracking resistance of bituminous mixtures by means of fenix test*; 2012; Vol. 4; ISBN 9789400745650.
43. Pérez-jiménez, F.E.; Miró, R.; Martínez, A.H.; Botella, R.; López-, T. Procedure for the evaluation and comparison of the cracking resistance of bituminous mixtures. Characteristic curve. Fénix diagram. In Proceedings of the 7th Eurasphalt and Eurobitume Congress; 2021.
44. Anjaly, M. Coir fiber as a sustainable material in pavement construction. *Sustain. Agri, Food Environ. Res.* **2021**, *10*, 1–10, doi:10.7770/safer-v10n1-art2538.
45. Losa, M.; Leandri, P.; Cerchiai, M. Improvement of pavement sustainability by the use of crumb rubber modified asphalt concrete for wearing courses. *Int. J. Pavement Res. Technol.* **2012**, *5*, 395–404.
46. Cheng, Y.; Chai, C.; Zhang, Y.; Chen, Y.; Zhu, B. A new eco-friendly porous asphalt mixture modified by crumb rubber and basalt fiber. *Sustain.* **2019**, *11*, doi:10.3390/su11205754.
47. Lizasoain-Arteaga, E.; Castro-Fresno, D.; Flintsch, G.W. Effect of durability on fiber-reinforced asphalt mixtures sustainability. *Pavement, Roadway, Bridg. Life Cycle Assess.* **2020**, *2020*, 442–449, doi:10.1201/9781003092278-46.
48. Pré Consultants SimaPro Database Manual Methods Library 2022.
49. *JRS VIATOP 66 pellets für fasermofizierte Asphaltbauweisen*; Rosenberg, Germany, 2022;
50. Valdés-Vidal, G.; Calabi-Floody, A.; Duarte-Nass, C.; Mignolet, C.; Díaz, C. Development of a New Additive Based on Textile Fibers of End-of-Life Tires (ELT) for Sustainable Asphalt Mixtures with Improved Mechanical Properties. *Polymers (Basel)*. **2022**, doi:10.3390/polym14163250.
51. Valdés-Vidal, G. *FiTyre® Un desarrollo para contribuir a la durabilidad de las mezclas asfálticas a partir de las FtNFU*; Santiago; Chile, 2022;

52. Cámara de la Industria del Neumático de Chile *Generación de neumáticos fuera de uso*; 2020;
53. MMA Decreto Supremo DS N°8 - Metas de Recoleccion y Valorizacion y Otras Obligaciones Asociadas de Neumáticos. *Minist. del Medio Ambient.* **2021**.
54. Gupta, A.; Lastra-Gonzalez, P.; Castro-Fresno, D.; Rodriguez-Hernandez, J. Laboratory characterization of porous asphalt mixtures with aramid fibers. *Materials (Basel)*. **2021**, *14*, doi:10.3390/ma14081935.
55. Takaikaew, T.; Hoy, M.; Horpibulsuk, S.; Arulrajah, A.; Mohammadinia, A.; Horpibulsuk, J. Performance improvement of asphalt concretes using fiber reinforcement. *Heliyon* **2021**, *7*, e07015, doi:10.1016/j.heliyon.2021.e07015.
56. Parimita, P. Influence of Natural Fibers as Additive on Characteristics of Stone Mastic Asphalt. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2020**, *970*, doi:10.1088/1757-899X/970/1/012021.
57. Okuda Benavides, Mayumi Gómez Restrepo, C. Metodología de Investigación y Lectura Crítica de Estudios. *Rev. Colomb. Psiquiatr.* **2005**, *34*, 118–124.
58. Papageorgiou, K.; Singh, P.K.; Papageorgiou, E.; Chudasama, H.; Bochtis, D.; Stamoulis, G. Fuzzy cognitive map-based sustainable socio-economic development planning for rural communities. *Sustain.* **2020**, *12*, 1–31, doi:10.3390/su12010305.
59. Olazabal, M.; Pascual, U. Use of fuzzy cognitive maps to study urban resilience and transformation. *Environ. Innov. Soc. Transitions* **2016**, *18*, 18–40, doi:10.1016/j.eist.2015.06.006.
60. Bello Lara, R.; González Espinosa, S.; Leyva Vázquez, M.Y. Análisis estático en mapas cognitivos difusos basado en una medida de centralidad compuesta. *Ciencias la Inf.* **2014**, *45*, 31–36.
61. Valdivia Salinas, N.A. Modelo De Priorización De Proyectos Hidráulicos De Riego, a Través De Técnicas De Evaluación Multicriterio, 2014.