



**Análisis Comparativo entre el sistema tradicional de pavimentación y el sistema de pavimentación que utiliza material proveniente de neumáticos reciclados basado en la dimensión ambiental en la comuna de Padre Hurtado, Región Metropolitana.**

Proyecto de Título para optar al Título de Constructor Civil

Estudiante:  
Esteban Andrés Fuentes Navarro

Profesor Guía:  
Carlos Cabañas

Fecha:  
Agosto 2022  
Santiago, Chile

***“ ¡Esto es por ti y por mi mamá!, eres mi ejemplo a seguir, espero poder ser como tu algún día, cada logro en mi vida es gracias a ti y este no es la excepción. ”***

## **AGRADECIMIENTOS**

*Solo palabras de agradecimientos a todas las personas que han estuvieron desde el inicio en mi proceso universitario hasta el día de hoy, en especial a mi familia y amigos que siempre estuvieron dándome palabras de ánimo para lograr cumplir con mi objetivo que es poder ser un profesional y mejor persona.*

*Por otro lado, agradecer a mis compañeros de Universidad que, si ellos no hubiera sido lo mismo ya que, con el constante apoyo que nos dimos, hemos podido finalizar nuestra carrera y poder estar titulándonos.*

*Y finalmente agradecer a la mente maestra, Don Carlos Cabañas (mi profesor guía,) el cual fue el responsable de que pudiera sacar mi investigación adelante y estar en estos momentos escribiendo las últimas palabras de mi investigación que seguramente me harán sentir muy orgulloso luego de haber entregado todas mis ganas y buenas energías para culminar de la mejor manera mi investigación.*

SOLO USO ACADÉMICO

## **ÍNDICE**

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| RESUMEN .....                                                                                                                                                                                  | 9  |
| SUMMARY .....                                                                                                                                                                                  | 10 |
| <b>ANTECEDENTES GENERALES</b> .....                                                                                                                                                            | 11 |
| Vertederos Ilegales .....                                                                                                                                                                      | 12 |
| Volumen de neumáticos desechados en Chile.....                                                                                                                                                 | 12 |
| Experiencia en el reciclaje de neumático en pavimentos .....                                                                                                                                   | 13 |
| <b>PROBLEMÁTICAS</b> .....                                                                                                                                                                     | 14 |
| JUSTIFICACION DEL PROBLEMA .....                                                                                                                                                               | 14 |
| Contexto General.....                                                                                                                                                                          | 14 |
| Contexto Especifico.....                                                                                                                                                                       | 15 |
| <b>OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....                                                                                                                                                     | 15 |
| Objetivo General: .....                                                                                                                                                                        | 15 |
| Objetivos Específicos: .....                                                                                                                                                                   | 15 |
| HIPOTESIS DE TRABAJO .....                                                                                                                                                                     | 15 |
| <b>1.0 Identificación y Caracterización de los elementos básicos que componen los sistemas de pavimentación con material tradicional y el sistema que combina con material reciclado</b> ..... | 16 |
| <b>1.1 Sistema de Pavimento Flexible Tradicional (SPT)</b> .....                                                                                                                               | 16 |
| 1.1.1 Movimientos de Tierra .....                                                                                                                                                              | 17 |
| 1.1.2 Subrasante.....                                                                                                                                                                          | 18 |
| 1.1.3 Subbase .....                                                                                                                                                                            | 19 |
| 1.1.4 Base Estabilizada.....                                                                                                                                                                   | 19 |
| 1.1.5 Proceso de Riego de Imprimación y Riego de Liga .....                                                                                                                                    | 21 |
| 1.1.6 Mezclas asfálticas .....                                                                                                                                                                 | 21 |
| <b>1.2 Diseño de Mezclas de Concreto Asfáltico y capas de Protección Asfálticas. (MINVU)</b> .....                                                                                             | 22 |
| 1.2.1 Agregados pétreos .....                                                                                                                                                                  | 23 |
| 1.2.2 Parámetros Estructurales de medición para las mezclas Asfálticas .....                                                                                                                   | 24 |
| <b>1.3 Sistema de Pavimento Reciclado (SPR)</b> .....                                                                                                                                          | 25 |
| 1.3.1 Pavimento Modificado con Polvo de Caucho .....                                                                                                                                           | 27 |
| 1.3.2 Betún Modificado con Polvo de neumático – Cirtec.....                                                                                                                                    | 28 |
| 1.3.3. Características de los betunes modificados con caucho .....                                                                                                                             | 29 |
| 1.3.4 Características de las mezclas con RARx y BMAVC-1: .....                                                                                                                                 | 31 |

|                                                                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.0 Caracterización global de cada sistema de pavimentación considerando su dimensión ambiental.....</b>                     | <b>35</b> |
| <b>2.1 El Cambio climático y el Medio Ambiente.....</b>                                                                         | <b>35</b> |
| 2.1.1 Lineamientos Ambientales en la Dirección Vial .....                                                                       | 37        |
| 2.1.2 Impactos Ambientales asociados a la construcción de una red vial. ....                                                    | 38        |
| <b>2.2 Sistemas de Pavimentación Flexible Tradicional y el Medio Ambiente.....</b>                                              | <b>38</b> |
| <b>2.3 Sistema de Pavimentación Reciclado (NFU) y el Medio Ambiente.....</b>                                                    | <b>41</b> |
| <b>3.0 Comparación de ambos tipos de pavimentos en función de sus ventajas y desventajas para las dimensión ambiental. ....</b> | <b>46</b> |
| <b>3.1 Sistemas de Pavimentación Tradicional SPT.....</b>                                                                       | <b>47</b> |
| 3.1.1 Ventajas Técnicas de los SPT:.....                                                                                        | 48        |
| 3.1.2 Desventajas Técnicas de los SPT: .....                                                                                    | 48        |
| 3.1.3 Ventajas Medio Ambientales de los SPT: .....                                                                              | 48        |
| 3.1.4 Desventajas Medio Ambientales de los SPT:.....                                                                            | 48        |
| <b>3.2 Sistemas de Pavimentación Reciclado SPR.....</b>                                                                         | <b>48</b> |
| 3.2.1Ventajas Técnicas de los SPR: .....                                                                                        | 49        |
| 3.2.2 Desventajas Técnicas de los SPR: .....                                                                                    | 50        |
| 3.2.3 Ventajas Medio Ambientales de los SPR: .....                                                                              | 50        |
| 3.2.4 Desventajas Medio Ambientales de los SPR:.....                                                                            | 50        |
| <b>4.0 Conclusiones sobre el análisis comparativo entre los SPT y los SPR .....</b>                                             | <b>51</b> |
| <b>Bibliografía .....</b>                                                                                                       | <b>53</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                                                                                                             | <b>57</b> |

## **Índice de Figuras**

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura N°1:</b> Estructura Típica de un Pavimento Asfáltico.....                            | 17 |
| <b>Figura N° 2:</b> Trabajo de Movimiento de Tierras para Pavimentos.....                      | 17 |
| <b>Figura N°3:</b> Preparación de Subrasante.....                                              | 18 |
| <b>Figura N°4:</b> Trabajos de Subbase y Base Estabilizada para Pavimentos.....                | 20 |
| <b>Figura N°5:</b> Riego de liga / Riego de Imprimación.....                                   | 21 |
| <b>Figura N°6:</b> Mezcla Asfáltica en Caliente .....                                          | 22 |
| <b>Figura N° 7:</b> Agregados Pétreos para Pavimentos .....                                    | 24 |
| <b>Figura N° 8:</b> Polambiente: Misión y Visión.....                                          | 26 |
| <b>Figura N° 9:</b> Cirtec: Aditivo RARx.....                                                  | 27 |
| <b>Figura N°10:</b> Proceso de Fabricación del Betún Modificado con Polvo de Caucho.....       | 28 |
| <b>Figura N° 11:</b> Betún Asfáltico Modificado con Polvo de Caucho .....                      | 29 |
| <b>Figura N°12:</b> Polvo de Caucho.....                                                       | 29 |
| <b>Figura N°13:</b> Proceso de Mezcla entre el polvo de NFU y Betún Asfáltico.....             | 29 |
| <b>Figura N°14:</b> Maquina Mezcladora.....                                                    | 30 |
| <b>Figura N°15:</b> Muestras de Deformaciones y Ahuellamientos .....                           | 33 |
| <b>Figura N°16:</b> Simulación de Ensayo a Torsión.....                                        | 35 |
| <b>Figura N°17:</b> Primera opción para la rehabilitación de la Autopista (Min. de México).... | 43 |
| <b>Figura N°18:</b> Segunda opción para la rehabilitación de la Autopista (Sacyr).....         | 43 |
| <b>Figura N°19:</b> Tercera opción para la rehabilitación de la Autopista (Cirtec).....        | 44 |

## ***Índice de Tablas***

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla N°1:</b> Banda Granulométrica Sub-Base .....                                             | 19 |
| <b>Tabla N°2:</b> Banda Granulométrica Base Estabilizada.....                                     | 20 |
| <b>Tabla N°3:</b> Actividades contaminantes (entrada y salidas) .....                             | 39 |
| <b>Tabla N°4:</b> Impactos Ambientales en la construcción y mantenimiento de un pavimento...40    |    |
| <b>Tabla N°5:</b> Descripción del Producto RARx.....                                              | 42 |
| <b>Tabla N°6:</b> Composición de la Mezcla RARx.....                                              | 42 |
| <b>Tabla N°7:</b> Composición de las mezclas asfálticas estudiadas.....                           | 44 |
| <b>Tabla N°8:</b> Categoría de Impactos Ambientales en la rehabilitación de las Autopista.....    | 45 |
| <b>Tabla N°9:</b> Resultados obtenidos sobre la cantidad de Material Particulado Total (mPt)...46 |    |
| <b>Tabla N°10:</b> Análisis Comparativo entre los SPT y los SPR -Dimensión Técnica.....           | 51 |
| <b>Tabla N° 11:</b> Análisis Comparativo entre los SPT y los SPR-Dimensión Medioambiental.        | 52 |

## ***Índice de gráficos***

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gráfico N°1:</b> Fuentes contaminantes de la R.M.....                                         | 11 |
| <b>Gráfico N°2:</b> Desechos de NFU anual en Chile.....                                          | 12 |
| <b>Gráfico N°3:</b> Ensayo de Reducción de Ruido.....                                            | 31 |
| <b>Gráfico N°4:</b> Ensayo de Regularidad Superficial Longitudinal IRI .....                     | 32 |
| <b>Gráfico N°5:</b> Ensayo de Fatiga .....                                                       | 32 |
| <b>Gráfico N°6:</b> Ensayo de Regularidad Transversal.....                                       | 33 |
| <b>Gráfico N°7:</b> Ensayo de Fisuración y otros deterioros superficiales.....                   | 34 |
| <b>Gráfico N°8:</b> Ensayo a Torsión.....                                                        | 34 |
| <b>Gráfico N°9:</b> Impactos Ambientales en la construcción y mantenimiento de un pavimento..... | 41 |

## RESUMEN

Hoy en día el cambio climático es muy relevante para todas las personas, es por esto que se combate a diario para reducir las omisiones de CO<sub>2</sub> que se expulsan a diario, ya sea de las empresas, automóviles o las mismas personas que habitan el planeta Tierra.

En Chile, el año 2021 se logró una venta total de 415.581 vehículos según publicó la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC)(Carolina Gonzales & Emol, 2022) siendo este último uno de los agentes contaminadores más importante de la capital en conjunto con el transporte público con un 39% de emisiones de CO<sub>2</sub> (Superintendencia del Medio Ambiente Gob. de Chile SMA, 2020), en donde además se encuentra un elemento importante para la investigación, este es el neumático.

El neumático es un producto altamente contaminante, este tiene un vida estimada hasta su degradación de 500 años aprox.(Francisco Tampier Palacios & Universidad Mayor, 2015), anualmente se producen altas cantidades de este producto a nivel mundial y su reutilización es muy baja el cual afecta directamente al medio ambiente, en donde, para fines del año 2019 en Chile se llegó a obtener 145mil toneladas de desechos de NFU (Camara de la Industria del Neumático de Chile A.G. (CINC), 2020), es por esto que la empresa Polambiente desde el año 2009 imparte el reciclaje de este producto, pero utilizándolo para la creación de pisos de seguridad, canchas de pasto sintético o aislante acústico.(Polambiente, 2020)

Por otro lado, la empresa española Cirtec creó un betún asfáltico en base a neumático una vez finaliza su vida útil (NFU), este debe pasar antes por una serie de procesos mecánicos con el fin de llegar a obtener polvo de neumático y añadirlo a la mezcla asfáltica, con el fin de lograr analizar su comportamiento en diferentes ensayos y ver en cómo afecta o mejora las capacidades estructurales con la inclusión de este nuevo elemento. (CIRTEC - Betunes Caucho RARx, 2022) Además, la empresa Cirtec, realizó un análisis de ciclo de vida entre el pavimentos asfáltico tradicional y modificado con polvo de neumático para analizar cómo actúa la integración de polvo de neumático a la mezcla bituminosa y ver si esta pueda aportar a la disminución de CO<sub>2</sub> al medio ambiente (CIRTEC: Estudio de análisis de ciclo de vida comparativo de rehabilitación entre mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con aditivo RARx., 2020). Además, se observará un estudio sobre la huella de carbono producida por el pavimentos asfáltico tradicional hecho en Ecuador. (Beltrán et al., 2021)

Finalmente, serán comparados según su capacidad estructural y dimensión ambiental observando su aporte de emisiones de gases hacia el medio ambiente y concluir si este método sustentable puede ser una opción viable para disminuir la contaminación ambiental aportando a la economía circular utilizando el neumático fuera de uso y porque no, poder integrarlo en la comuna de Padre Hurtado, ubicada en Santiago de Chile.

**Palabras Claves: Cambio Climático, Neumático Fuera de Uso, Reciclaje, Pavimento Asfáltico.**

## SUMMARY

Nowadays climate change is very relevant to all people, which is it a fought daily to reduce CO<sub>2</sub> emissions that are expelled daily, either from car companies or the same people who speak who inhabit the planet Earth.

In 2021, a total sale of 415,581 vehicles was achieved, as published by the National Automotive Association of Chile (ANAC) (Carolina Gonzales & Emol, 2022), the latter being one of the most important pollutants in the capital in conjunction with public transport with 39% CO<sub>2</sub> emissions (Super intendencia del Medio Ambiente Gob. de Chile SMA, 2020), where there is also an important element for research, this is the tire.

The tire is a highly polluting product, it has an estimated life of its degradation of about 500 years. (Francisco Tampier Palacios & Universidad Mayor, 2015), annually high quantities of this product are produced worldwide and its very low reuse which directly affects the environment, where, by the end of 2019, in Chile, 145 thousand tons of NFU waste (Camara de la Industria del Neumático de Chile A.G. (CINC), 2020), that is why the company Polambiente has been recycling this product since 2009, but using it for the creation of safety floors, synthetic grass courts or acoustic insulation.

On the other hand, the Spanish company Cirtec created an asphalt bitumen based on a tire once its useful life ends (NFU), it must first go through a series of mechanical processes to obtain tire dust and add it to the asphalt mixture, to analyze its behavior in different tests and see how it affects or improves structural capacities with the inclusion of this new element. (CIRTEC - Betunes Caucho RARx, 2022) In addition, the company Cirtec, carried out a life cycle analysis between the traditional asphalt pavements and modified with tire dust to analyze how the integration of tire dust into the bituminous mixture works and see if it can contribute to the reduction of CO<sub>2</sub> to the environment. (CIRTEC: Estudio de análisis de ciclo de vida comparativo de rehabilitación entre mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con aditivo RARx., 2020)

In addition, a study on the carbon footprint produced by traditional asphalt pavements made in Ecuador will be observed. (Beltrán et al., 2021)

Finally, they will be compared according to their structural capacity and environmental dimension by observing their contribution of gas emissions to the environment and concluding whether this sustainable method can be a viable option to reduce environmental pollution by contributing to the circular economy using the tire out of use and why not, to be able to integrate it into the commune of Padre Hurtado, located in Santiago de Chile.

**Keywords: Climate Change, Out of use Tire, Recycling, Asphalt Paviment.**

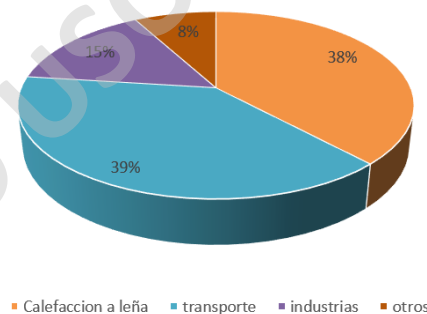
## ANTECEDENTES GENERALES

En la actualidad la contaminación ambiental es un tema importante a nivel global; un ejemplo claro es la cantidad de plástico que existe en el mundo, numerosas industrias que provocan un alto grado de contaminación, como por ejemplo la Automotriz, que cada año sigue aumentando sus niveles de producción para que más autos puedan salir a las calles y los neumáticos que son desechados llegan a vertederos ilegales y pocos de ellos son reciclados.

Esta industria es una de las principales contaminantes en Chile por la cantidad de autos que son vendidos anualmente, según publicó la ANAC. En base a sus datos, en el año 2021 se vendieron un total de 415.581 vehículos (Carolina Gonzales & Emol, 2022) en donde, Región Metropolitana abarca un 43% de los vehículos motorizados y es en donde se encuentra la mayor concentración de automóviles en Chile (Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería ISCI, 2021), siendo este último uno de los agentes contaminadores más importante de la capital en conjunto con el transporte público con un 39% seguido de la calefacción a leña con un 38% y finalmente las industrias que aportan un 15% a la contaminación de la RM (Superintendencia del Medio Ambiente Gob. de Chile SMA, 2020), pero existe un elemento que también contamina, que tiene una vida útil mucho menor a la del automóvil y además tiene una duración prolongada para degradarse, lo que afecta al medio ambiente: el neumático.

Gráfico 1: Fuentes contaminantes de la R.M.

Fuentes Contaminantes en la R.M.



Fuente: Elaboración propia, rescatado de: Superintendencia del medio ambiente, Gob. de Chile 2020.-  
[www.portal.sma.gob.cl/index.php/2020/06/18/realizan-un-fuerte-llamado-a-no-usar-calefactores-a-leña-en-el-gran-santiago-para-evitar-aumento-de-covid-19-y-contaminacion-del-aire/](http://www.portal.sma.gob.cl/index.php/2020/06/18/realizan-un-fuerte-llamado-a-no-usar-calefactores-a-leña-en-el-gran-santiago-para-evitar-aumento-de-covid-19-y-contaminacion-del-aire/)

El neumático no tiene la misma vida útil que el automóvil y rápidamente se convierten en un material desechado por las personas e industrias denominado *Neumático Fuera de Uso (NFU)*, Estos tienen un proceso de degradación de más de 500 años debido a su fabricación, en donde está compuesto principalmente de tres productos: caucho (natural y sintético), acero y fibra textil. (Francisco Tampier Palacios & Universidad Mayor, 2015). Por ello se ha decidido buscar la forma de elaborar a través del neumático un plan de construcción más amigable con el medio ambiente y para eso se debe utilizar los materiales reciclables que se tienen al alcance ya que, en la actualidad se producen 6,6 millones de neumáticos de las

cuales solo un 17% se maneja en forma ambientalmente racional, en donde del porcentaje restante termina siendo depositado en basurales y vertederos clandestinos. (Revista Minera Crisol, 2021)

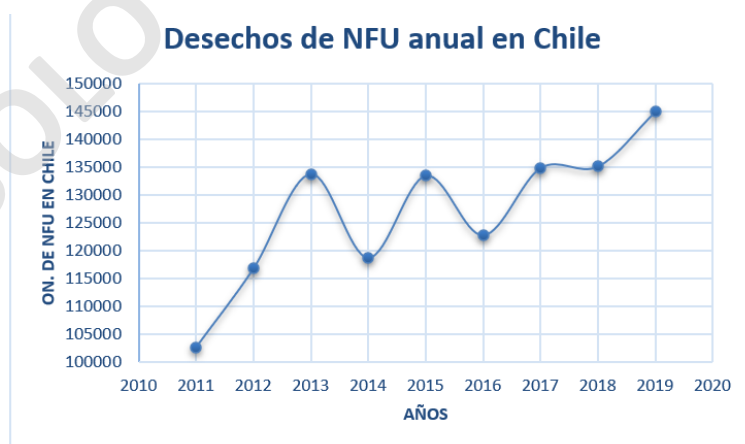
### ***Vertederos Ilegales***

Según un estudio realizado por académicos de la Escuela de Construcción Civil de la Pontificia Universidad Católica, en la actualidad existen un total de 3.735 vertederos ilegales y microbasurales en Chile, estimando un área total de 1.444,08 hectáreas equivalente al 101% del aérea de la comuna de Providencia, en donde la Región concentra los mayores sitios, los cuales corresponden al 24,93% de vertederos y basurales y le siguen la Región de Valparaíso con un 16,14% y finalmente la Región de Coquimbo con un 11,06% del total nacional. (Felipe Osorio et al., 2021)

### ***Volumen de neumáticos desechados en Chile.***

Según los datos de la Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G.(CINC), la generación de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) en Chile a lo largo de la última década (2011-2019) ha ido en alza a través de los años, como podemos observar en el gráfico de "Desechos de NFU anual en Chile", a inicios de la década en el año 2011, la cantidad total de NFU generada en Chile era alrededor de 102mil toneladas y para fines del año 2019 se llegó a obtener 145mil toneladas de desechos de NFU, es decir, a lo largo de la década el desecho de neumático aumentó en un 42%, es por esto que es importante implementar el reciclaje de neumáticos en la construcción de pavimentos ya que aportaría a la disminución de la contaminación que provoca el neumático hacia el medio ambiente. (Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G. (CINC), 2020)

Gráfico 2: Desechos de NFU anual en Chile



Fuente: Elaboración propia, rescatado de: Cámara de la industria del Neumático en Chile  
- <https://cinc.cl/wp-content/uploads/2020/07/200727-Estad%C3%ADsticas-NFU.pdf>

Hoy en día existe una empresa española llamada CIRTEC que trabaja con un betún modificado con polvo de caucho denominado RARx, con la finalidad de integrarlo al pavimento asfáltico. Este aditivo le permite mejorar las cualidades con que ya cuentan los pavimentos tradicionales, en donde logra una mayor durabilidad y resistencia para soportar de mejor manera las cargas de vehículos, además de lograr mayor impermeabilidad de agua para así disminuir las fallas que el pavimento pueda experimentar, ya sea desde fisuras hasta agrietamientos al interior de sus capas creando así un nuevo pavimento. (CIRTEC - Betunes Caucho RARx, 2022)

El pavimento es una superficie formada por varias capas con la función de recibir cargas de automóviles y/o personas; estos pavimentos se subdividen dos grupos: los pavimentos rígidos que son formados por agua, cemento, grava o gravilla y, los pavimentos flexibles que son de asfalto, es decir, un mineral negro natural o también formado por la destilación de petróleo en conjunto con sus bases y sub-base. (MINVU, 2018)

### ***Experiencia en el reciclaje de neumático en pavimentos***

- Experiencias Internacionales:

El origen del pavimento modificado en base al reciclaje de neumático fue desarrollado por Charles McDonald en Estados Unidos en el año 1960 denominado asfalto ecológico, en donde, él noto que el neumático una vez procesado y estando en su forma plástica, este se podría utilizar en el asfalto con el propósito de solucionar problemas con la flexibilidad y durabilidad; sin embargo este método no fue utilizado hasta el siglo XX cuando su costo de producción permitió el uso de este de forma económica. (AMORIM, 2018)

- Experiencias Nacionales:

En Chile en el año 2009 se imparte el reciclaje de neumático con la empresa Polambiente, ellos trabajan mediante el proceso de trituración de neumático, en donde, se extraen distintos tamaños de agregados de goma y polvo de caucho, el cual sirve como materia prima para luego fabricar nuevos productos, transformado estos residuos en una solución para contribuir a una economía circular. (Polambiente, 2022). En el año 2020 la empresa Cirtec junto con Sacyr, marcaron un hito en Chile ya que construyeron la primera obra vial utilizando asfaltos con polvo de neumático a través de un aditivo llamado RARx, dicha obra fue realizada en Santiago de Chile, en Avenida La Florida y Avenida de Cristobal Colón en donde se colocaron dos tramos de 1Km cada uno con mezcla asfáltica de alta viscosidad, este tipo de obras se han realizado en España, México y otros países en donde, la mezcla ha demostrado su potencial, eficiencia ambiental y económica, logrando reducir el espesor del asfalto en más de un 50% causando el aumento de la vida útil del pavimento. (Cirtec, 2020)

Según el estudio sobre la distribución de la red vial Nacional según tipo de rodadura por parte del Ministerio de Obras Públicas en el año 2021, la distribución de la red vial en Chile se

clasifica en 7 tipos de caminos o carreteras; vías de tierra, ripio, granular estabilizado, capa de protección, básico intermedio, pavimentos hormigón y asfalto, en donde estos últimos aportan al 2,6% y 21,6% respectivamente del total de la red vial que cuenta con total de 85.983,875Km.(Ministerio de Obras Publicas- Dirección de Viabilidad, 2021). En tanto, la comuna de Padre Hurtado cuenta con una longitud total de sus calles de 244.601,114 metros, siendo estas construidas de hormigón y asfalto, en donde también hay calles sin pavimentar(13.100,737 metros de longitud)(Municipalidad de Padre Hurtado & Unidad de Proyectos - SECPLA, 2022)

Es por esto que, tiene sentido e importancia realizar una comparación entre los tipos de pavimentos basándose en sus características y también en su dimensión ambiental para saber si el pavimento modificado puede ser una opción viable de utilizar en la comuna de Padre Hurtado y que ayude al medio ambiente, ya que se buscan nuevos métodos constructivos más amigables con el medio ambiente para la comuna que registra un déficit de un 5% de pavimentación.

## **PROBLEMÁTICAS**

- En Chile no existe una normativa que regule y aplique el reciclaje de neumáticos en la construcción de red viales ya que solo existe sobre pavimentos flexibles tradicionales. (MINVU, 2018)
- En la actualidad se desechan 6,6 millones de neumáticos equivalentes a 180 mil toneladas, pero si consideramos su desgaste por uso, la generación anual se estima en 140 mil toneladas (País Circular, 2019), en donde la mayor parte de ella se va a vertederos ilegales.
- La necesidad de incorporar la dimensión ambiental y el reciclaje en una comuna que tiene interés en explorar esta posibilidad.
- Déficit de pavimentación de un 5% de un total de 244.601,1 metros de longitud de pavimentación en la comuna de Padre Hurtado, situación que puede ser aprovechada para trabajar con esta nueva tecnología.(Municipalidad de Padre Hurtado & Unidad de Proyectos - SECPLA, 2022)
- En Chile falta crear más conciencia y educar a las personas acerca del reciclaje, como señala Vicente Izquierdo Jefe de Proyecto de Polambiente: “falta que se cree mayor conciencia y no solo en los adultos, es nuestra generación la que se aprovechó del sistema. Antes se contaminaba menos, lo que tenemos que hacer es crear conciencia y seguir reciclando”.(Home, 2018)

## **JUSTIFICACION DEL PROBLEMA**

### **Contexto General**

Chile no cuenta con una normativa que regule la construcción de los pavimentos modificados a base de neumáticos, pero existe la Ley de Responsabilidad Extendida al Productor (N° 20.920 promulgada en el diario oficial el 16 marzo del 2021 – REP), la que busca que las

empresas del rubro automotriz logren reutilizar el 90% de los neumáticos al año 2030 (GOB. Regional de Arica y Parinacota, 2018) como un avance en la economía circular en el rubro de la construcción. Ello vuelve una opción viable dar inicio a un sistema de pavimentación que contenga este nuevo material reciclado, ya que contribuiría a disminuir la contaminación ambiental, sabiendo que en Chile solo un 24% de todas sus calles o carreteras a lo largo del país son de asfalto u hormigón y un 76% son caminos que aún no son pavimentados (Ministerio de obras Públicas, 2019).

### ***Contexto Específico***

La comuna de Padre Hurtado, cuenta con una longitud total de sus calles de 244.601,114 metros, registrando un déficit de un 5% de la totalidad de longitud de las calles existentes en la comuna que no han sido pavimentadas (Municipalidad de Padre Hurtado & Unidad de Proyectos - SECPLA, 2022). Lo anterior implica que la comunidad de P. Hurtado tenga una postura favorable para aceptar este nuevo tipo de solución al pavimentar y utilizarlo en las calles faltantes y reparar alguna avenida que tenga deteriorada. Además, la disponibilidad del material para reciclar es alta, ya que al menos la empresa Polambiente, que opera en la comuna de Lampa en la Región Metropolitana, logra reciclar más de 10.000 toneladas de neumáticos al año, aproximadamente. (Polambiente: ¿Por qué reciclar?, 2022)

## **OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### ***Objetivo General:***

Realizar un análisis comparativo entre el sistema tradicional para pavimentación y un sistema que utiliza una combinación con material proveniente de neumáticos reciclados, basada en su dimensión ambiental, en la comuna de Padre Hurtado, Región Metropolitana.

### ***Objetivos Específicos:***

- 1.-Identificar y caracterizar los elementos básicos que componen los sistemas de pavimentación con material tradicional y el sistema que combina con material reciclado
- 2.-Realizar una caracterización global de cada sistema de pavimentación considerando su dimensión ambiental.
- 3.-Comparar ambos tipos de pavimentos en función de sus ventajas y desventajas para las dimensión ambiental.

## **HIPOTESIS DE TRABAJO**

¿Es posible realizar una comparación ambiental de los distintos tipos de pavimentos? A base de esta hipótesis de trabajo se genera la siguiente pregunta de investigación:

## ***1.0 Identificación y Caracterización de los elementos básicos que componen los sistemas de pavimentación con material tradicional y el sistema que combina con material reciclado***

Un pavimento es una superficie artificial formada por una estructura de varias capas, una sobre otra, diseñadas y constituidas teniendo en cuenta métodos, normas y especificaciones técnicas para materiales apropiados sometidos a distintos procesos de construcción con la finalidad de obtener una superficie que presente una rigidez y durabilidad apta y necesaria tanto para el tránsito de vehículos y/o personas. (Ingeniería y Construcción, 2020).

La función de los pavimentos es soportar las cargas de vehículos para que estos puedan transitar de un lugar a otro entregándole una mayor comodidad al conductor, ya que el pavimento cuenta con una superficie rugosa en donde esta le entrega mayor adherencia al automóvil al rodar sobre el pavimento.

Existen diferentes tipos de pavimentos el cual, se dividen en dos tipos: rígidos, los cuales son formados por agua, cemento, grava o gravilla y, pavimentos flexibles, que son de asfalto, es decir, un mineral negro natural o también formado por la destilación de petróleo, en conjunto con el betún asfáltico que se utiliza para realizar la mezcla asfáltica, en donde estos se diferencian en su forma de construcción, resistencias y durabilidad, en donde nos basaremos en este último tipo de pavimento para la investigación.

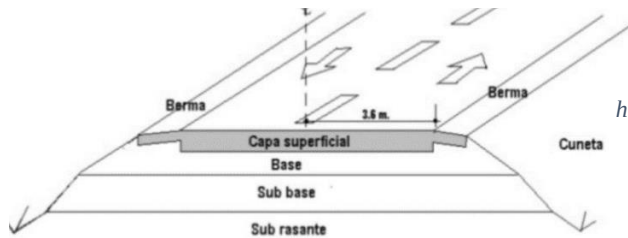
Por otro lado, en los últimos años ha surgido un nuevo tipo de pavimento integrando material proveniente de neumáticos. Al igual que los pavimentos tradicionales, está formado por distintas capas, en donde se integra el aditivo directamente de granos de neumáticos en el hormigón para los pavimentos rígidos o polvo de caucho en los betunes para los pavimentos flexibles. La empresa encargada que posee esta nueva tecnología es CIRTEC de origen Español.

### ***1.1 Sistema de Pavimento Flexible Tradicional (SPT)***

Los pavimentos flexibles, como ya se mencionó anteriormente, están hechos por medio de asfalto el cual está compuestos por materiales pétreos provenientes de minerales o en base a destilación de petróleo en conjunto con el betún asfáltico para fabricar la mezcla asfáltica.

Los pavimentos asfálticos cuentan con un paquete estructural conformado por diferentes capas estructurales, las cuales son: Subbase, Base Estabilizada y la Capa Asfáltica. Para realizar dichas capas estructurales es necesario ejecutar trabajos de Movimientos de Tierra, y los procesos de Riego de Liga e Imprimación, para esto, se deben asegurar que se cumplan con las especificaciones solicitadas. (SERVIUM, 2018)

Figura 1: Estructura típica de un pavimento asfáltico



Fuente: Rescatado de Ingeniería & Construcción -  
<https://www.ingenieriayconstruccioncolombia.com/tipos-de-pavimento/>

En primer lugar, antes de comenzar cualquier proyecto vial, siempre se debe tener en cuenta los niveles de suelo existentes en el lugar del proyecto, en donde, se deberá analizar y posteriormente planificar el proyecto de manera efectiva para cumplir con lo especificado en los planos desde inicio a fin. Para lograr nivelar el suelo según solicita el proyecto la primera etapa a ejecutar es el movimiento de tierras.

### 1.1.1 Movimientos de Tierra

Esta etapa, contempla un conjunto de actividades que se realizan para preparar el terreno y lograr que los niveles de suelo estipulados por proyecto, estas etapas son: Replanteos y Rellenos

- **Replanteo**

En esta etapa, el contratista deberá replantear el proyecto in situ, definiendo ejes, vértices y deflexiones del terreno y líneas de solera.

- **Rellenos**

Se deberá utilizar el mejor material proveniente de la excavación, es decir, el material de relleno deberá corresponder al tipo de suelo existente y planificado anteriormente según las maquinarias que se utilizaran al momento de compactar, el cual debe cumplir con el mínimo de un 95 % de compactación (Ensayo de Proctor Modificado), para esto existen tres tipos de espesores máximos:

- Suelo Fino: 0.15m. de espesor compactado.
- Suelos Finos con Granulares: 0.20m. de espesor compactado.
- Suelos Granulares: 0.30m. de espesor compactado.

Figura 2: Trabajo de movimiento de tierras para pavimentos.



Fuente: Rescatado de P&H construyendo soluciones -  
<https://pyhca.com/movimiento-tierra-obras-civiles/>

### 1.1.2 Subrasante

La Subrasante es la primera capa del paquete estructural del pavimento flexible, el cual soporta todas las cargas que transmite el tránsito de vehículos, en donde, esta debe cumplir con los requisitos de estabilidad, resistencia a la expansión y contracción, ya que la humedad puede provocar fallas en su capacidad estructural, en donde existen dos tipos de subrasante, las cuales son:

- **Subrasante natural**

Una vez dado los niveles de subrasante se deberán cumplir los siguientes pasos:

1. El suelo se escarificará 0.20m., es decir, se debe remover la tierra 0.20m y posteriormente compactar con la finalidad de proporcionar una superficie de apoyo homogénea.
2. La compactación se realiza hasta obtener una densidad mayor o igual al 95% de la D.M.C.S. del Proctor Modificado, NCh 1534/2, o al 80% de la densidad relativa, (NCh 1726), según corresponda.
3. El contratista debe solicitar la recepción de la partida para poder continuar con la colocación de la capa estructural siguiente, en donde, se deberán presentar los resultados obtenidos por el laboratorio de terreno.

La subrasante una vez finalizada debe cumplir con las pendientes y dimensiones establecidas en el proyecto además de la compactación especificada.

- **Subrasante mejorada**

La subrasante mejorada tiene como finalidad modificar a la subrasante natural siempre y cuando se indique en las especificaciones técnicas del proyecto, el cual consiste en una mezcla homogénea de suelo natural y chancado de acuerdo con los porcentajes indicados y se conformara escarificando el terreno natural en un espesor mínimo de 0.20m.

*Figura 3: Preparación de Subrasante*



Fuente: Rescatada del Código de Normas y Especificaciones técnicas de Obras de Pavimentación -  
[https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/normas\\_pavimentacion.pdf](https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/normas_pavimentacion.pdf)

### 1.1.3 Subbase

Esta capa está situada sobre la subrasante y por debajo de la base estabilizada, el cual tiene como función soportar, transmitir y distribuir uniformemente las cargas aplicadas en la superficie del pavimento provocadas por el tránsito de vehículos. Dicha capa, está conformada por material granular con la finalidad de obtener la capacidad de drenaje para evitar fallas que provoque el hinchamiento del agua causada por las bajas temperaturas, en donde, la capa de subbase debe cumplir con las siguientes especificaciones:

El material que se debe utilizar debe estar homogéneamente revuelto, es decir, debe estar libre de grumos o masas de arcilla, materiales vegetales o de cualquier otro material que pueda perjudicar a la mezcla, el cual, esta debe contener un porcentaje de partículas chancadas para lograr con el CBR especificado y el 60% o más de partículas retenidas por el tamiz N° 4 American Society for Testing and Materials (ASTM).

Tabla 1: Banda Granulométrica Sub-Base

| Tamiz<br>ASTM | % que pasa en peso |
|---------------|--------------------|
| 2"            | 100                |
| 1"            | 55 - 100           |
| 3/4"          | 30 - 75            |
| N° 4          | 20 - 65            |
| N° 10         | 10 - 50            |
| N° 40         | 5 - 30             |
| N° 200        | 0 - 20             |

Fuente: Rescatada del Cap. II.A: Especificaciones  
Técnicas de Pavimentos en Asfalto (SERVIURM) -  
<http://pavimentacion.serviurm.cl/doc/MPALL/CAP2A.pdf>

- **Compactación de Subbase**

La subbase debe ser compactada a una densidad mayor o igual a 95% de la D.M.C.S. obtenida en el ensayo Proctor Modificado, NCh 1534/2 o al 80% de la densidad relativa, (NCh 1726), según corresponda.

### 1.1.4 Base Estabilizada

La Base Estabilizada se ubica sobre la subbase y por debajo de la capa de rodamiento en donde, su función es soportar, distribuir y transmitir las cargas hacia la subbase. Dicha capa, está conformada por material granular en conjunto con material natural y también puede utilizarse cal o materiales bituminosos, el cual deben cumplir con las resistencias necesarias para recibir las cargas de la superficie para luego, poder transmitir las hacia las demás capas ubicadas por debajo de esta, en donde la capa de subbase debe cumplir con las siguientes especificaciones:

El material que se debe utilizar debe estar formada por un suelo de tipo grava arenosa, homogéneamente revuelto, es decir, debe estar libre de grumos o masas de arcilla, de materiales vegetales o de cualquier otro material que pueda perjudicar a la mezcla, el cual, esta debe contener un porcentaje de partículas chancadas para lograr con el CBR especificado y el 60% o más de partículas retenidas por el tamiz N° 4 American Society for Testing and Materials (ASTM).

Tabla 2: Banda Granulométrica Base Estabilizada

| Tamiz<br>ASTM | % Pasa en peso |
|---------------|----------------|
| 2"            | 100            |
| 1 1/2"        | 70 - 100       |
| 1"            | 55 - 85        |
| 3/4"          | 45 - 75        |
| 3/8"          | 35 - 65        |
| N° 4          | 25 - 55        |
| N° 10         | 15 - 45        |
| N° 40         | 5 - 25         |
| N° 200        | 0 - 8          |

Fuente: Rescatada del Cap. II.A: Especificaciones Técnicas de  
 Pavimentos en Asfalto (SERVIURM) -  
<http://pavimentacion.serviurm.cl/doc/MPALL/CAP2A.pdf>

Deberá estar comprendida dentro de la siguiente banda granulométrica:

- \* La fracción que pasa por la malla N° 200 no deberá ser mayor a los 2/3 de la fracción del agregado que pasa por la malla N° 40.
- \* La fracción que pasa la malla N°4 deberá estar constituida por arenas naturales o trituradas.

#### • Compactación de Base Estabilizada

La subbase debe ser compactada a una densidad mayor o igual a 95% de la D.M.C.S. obtenida en el ensayo Proctor Modificado, NCh 1534/2 o al 80% de la densidad relativa, (NCh 1726), según corresponda.

Figura 4: Trabajos de Subbase y Base Estabilizada para Pavimentos.



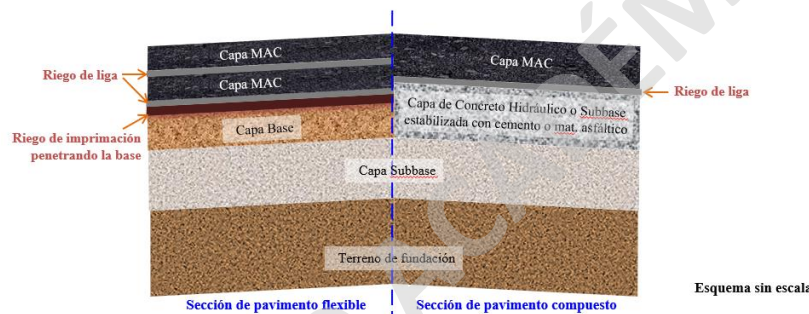
Fuente: Rescatada del Código de Normas y Especificaciones  
 técnicas de Obras de Pavimentación -  
[https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/normas\\_pavimentacion.pdf](https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/normas_pavimentacion.pdf)

### 1.1.5 Proceso de Riego de Imprimación y Riego de Liga

El objetivo de aplicar un riego de Imprimación o Riego de Liga formadas a partir de emulsiones asfálticas es producir adherencia entre las distintas capas estructurales que conforman el pavimento flexible, con la finalidad de que la estructura actúe en conjunto para lograr distribuir las cargas de tránsito.

Para el caso del Riego de Imprimación esta se aplica sobre la capa base de la estructural, es decir sobre la Capa de Base Estabilizada para que posteriormente se coloque el asfalto, en cambio, para el proceso de Riego de Liga, esta se puede aplicar tanto como sobre la Capa de Base estabilizada o superficie granular, o una superficie existente, es decir, sobre losas de concreto o superficies bituminosas.

Figura 5: Riego de liga / Riego de Imprimación



Fuente: Rescatado de Ministerio de Obras Públicas MOP (ppt)-  
[www.mop.gob.sv/wp-content/uploads/1970/01/riegos\\_imprimacion\\_liga.pptx](http://www.mop.gob.sv/wp-content/uploads/1970/01/riegos_imprimacion_liga.pptx)

### 1.1.6 Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas están constituidas por materiales pétreos de diferentes granulometrías, material asfáltico y a veces se utilizan aditivos por cumplir con las especificaciones, el cual están cubiertas por un ligantes asfáltico homogénea.

Esta mezcla, una vez colocada, es compactada para que los materiales que la constituyen puedan trabajar en conjunto; esto es provocado gracias al ligante asfáltico ya que hace que las partículas del agregado formen una masa cohesiva y poco permeable con la finalidad de que la mezcla sea resistente y rígida para soportar las cargas del tránsito vehicular, en donde la mezcla asfáltica en caliente es la más utilizada.

- **Mezcla Asfáltica en Caliente:**

Esta mezcla para poder ser confeccionada, el conjunto de materiales de la mezcla, es decir, los materiales pétreos y cemento o ligante asfáltico, deben estar a altas temperaturas

promediando los 150° C con la finalidad de obtener una adecuada viscosidad en el ligante, ha esto se le llama estado de fluidez, para asegurar la trabajabilidad de la mezcla asfáltica.

Esta mezcla es fabricada en plantas asfálticas en donde, se dosifican los materiales pétreos según su granulometría para luego, combinarlos, calentarlos y finalmente mezclarlo con el asfalto para para producir la mezcla deseada según estipule en las E.E.T.T. del proyecto.

Dicha mezcla es transportada en caminos tolva a una temperatura superior a los 120°C, en donde, antes de ser colocada sobre la base estabilizada o una superficie existente, se debe haber instalado la capa de imprimación o de riego según corresponda, para que esta se pueda adherir y conformar el paquete estructural.

Una vez terminado el proceso de Riego de Imprimación o de Liga, se coloca la mezcla asfáltica la cual, esta debe ser compactada con equipos destinados a la compactación de asfalto (rodillo liso, rodillo vibratorio o neumático) tan pronto sea posible para que esta no disminuya su temperatura con la finalidad de aumentar la resistencia y estabilidad de la mezcla, logrando disminuir el volumen de huecos y aumentando su densidad, permitiendo que esta tenga una mayor resistencia al desgaste en donde, la mezcla deberá compactarse hasta que alcance una densidad no inferior a 97% de la densidad Marshall.(SERVIUM, 2018)

*Figura 6: Mezcla Asfáltica en Caliente*



Fuente: Rescatada de HG Corp. -  
<https://www.hgcorp.com.mx/blog/mezcla-asfaltica-de-alta-calidad/>

## **1.2 Diseño de Mezclas de Concreto Asfáltico y capas de Protección Asfálticas. (MINVU)**

El proceso de diseño de mezclas asfálticas consiste en determinar las cantidades necesarias que se deben combinar en distintas fracciones de agregados, ligante asfáltico y si es necesario filler y aditivos, a fin de obtener la mezcla asfáltica requerida por el especificaciones dadas por proyecto; estas proporciones son relativas según los materiales, ya que se determinan las propiedades físicas de la mezcla y el desempeño de esta como parte del pavimento.(MINVU, 2018)

La mezcla asfáltica está constituida, fundamentalmente por material pétreo recubierto con una película de asfalto y luego sometido a un proceso de comparación, que hace que esta

mezcla tenga propiedades resistentes al desgaste producido por los vehículos y a su vez, este pueda traspasar la sollicitación de sus cargas hacia las capas inferiores, absorbiendo una cantidad apreciable de esta, en donde el agregado pétreo debe estar recubierto de un espesor de película de asfalto conveniente para someterla al proceso de compactación sin ser alterada. El espesor de película de asfalto que recubre el agregado pétreo es uno de los factores más relevantes dentro de la mezcla ya que regula este el comportamiento de las mezclas asfálticas, en cambio, el material pétreo aporta a la resistencia de la mezcla a través de la fricción y varía según el tamaño del árido y de la rugosidad de sus caras. Por otro lado, también es importante considerar en el diseño de la mezcla su trabajabilidad e impermeabilidad.

Una mezcla convencional deberá ser impermeable al paso del agua hacia las capas inferiores con la finalidad de lograr evitar que dichas capas pierdan capacidad de soporte al verse afectadas por la humedad, además es importante que la mezcla sea diseñada de manera que pueda ser colocada con facilidad para evitar segregaciones.

### **1.2.1 Agregados pétreos**

Si un pavimento asfáltico está sometido, por lo general, a un tránsito de bastante intensidad, los agregados pétreos empleados en su elaboración deben tener la cualidad de ser tenaces y además contar con una alta resistencia a la compresión y desgaste.

Algunos de los aspectos importantes que se deben cumplir los agregados pétreos en la mezcla son:

- Granulometría
- Resistencia al desgaste
- Solidez
- Limpieza y Pureza
- Propiedades Granulométricas, Superficiales y de Adherencia.

Existen tres tipos de agregados pétreos, estos son:

- 1) Agregados Gruesos: Son los agregados pétreos retenidos en el tamiz 2,5 mm. (Malla N° 8)
- 2) Agregados Finos: Son los agregados pétreos que pasan por el tamiz 2,5 mm. (Malla N°) siendo este retenido por el tamiz 0,08 mm. (Malla N° 200)
  - Filler Mineral: Conformar la parte de los agregados finos cuyo material pasa totalmente por el tamiz 0,63 mm. (Malla N°30), en donde este puede ser incorporado como material adicional, en cuyo caso se habla de filler de aportación.
- 3) Polvo Mineral: Material que pasa por el tamiz 0,08 mm. (Malla N° 200)

*Figura 7: Agregados Pétreos para Pavimentos*



Fuente: Rescato de 360 en Concreto -  
<https://360enconcreto.com/blog/detalle/usos-beneficios-y-recomendaciones-del-manejo-de-los-agregados/>

### ***1.2.2 Parámetros Estructurales de medición para las mezclas Asfálticas***

El diseño de pavimento tiene como finalidad obtener parámetros para ejecutar obras viales según su tipo y localización para que la mezcla cumpla satisfactoriamente con las solicitudes de carga y clima según su vida útil, en donde estas presentan propiedades aptas para su uso en pavimentos además de obtener propiedades propias de cada uno de los elementos que lo componen y para su determinación, se recomienda obtener y considerar los siguientes parámetros:

- **Estabilidad (propiedad estructural).**

La estabilidad es una medida de la resistencia hacia el pavimento y su valor se obtiene mediante un ensayo a compresión por una probeta semiconfinada; esta es la capacidad de resistir el desplazamiento y la deformación bajo la acción de las cargas de tránsito.

Una mezcla asfáltica como parte de un pavimento estable, es capaz de mantener su forma y rugosidad bajo cargas repetidas ya que, una mezcla inestable desarrolla ahuellamientos, ondulaciones y otras deformaciones que indican cambios en la mezcla.

- **Durabilidad (propiedad de construcción y servicio).**

Es la capacidad de poder resistir cargas a través del tiempo para evitar daños como la desintegración de la mezcla, el desprendimiento del agregado, cambios en las propiedades del asfalto como por ejemplo oxidación y finalmente separación de la película de asfalto. Estos daños son el resultado de la acción del clima, tránsito o una combinación entre ambos.

- **Impermeabilidad (propiedad de construcción y servicio).**

La impermeabilidad de una mezcla es la resistencia al paso del aire y agua hacia el interior del pavimento, esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, en donde, el grado de impermeabilidad está determinado por el porcentaje de vacíos presentes en la mezcla, su tamaño y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

- **Trabajabilidad (propiedad de construcción y servicio).**

Facilidad con que la mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada y, esta depende según los parámetros medidos, estos son: tipo de diseño de mezcla, tipo y forma del agregado y/o de su granulometría y el ligante asfáltico.

- **Flexibilidad (propiedad estructural).**

Capacidad de una mezcla asfáltica para adecuarse a los movimientos y asentamientos graduales de la subrasante y capas granulares sin sufrir fisuras y/o grietas, debido a que virtualmente, todas las subrasantes se asientan bajo cargas o se expanden producto del suelo.

- **Resistencia a la fatiga (propiedad estructural).**

Es la resistencia que presenta la mezcla a la flexión repetida gracias a las cargas del tránsito, es por esto que se ha demostrado que los vacíos en las mezclas el cual está relacionado con el contenido de asfalto y la viscosidad de este, provoca como efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga.

- **Resistencia al deslizamiento (propiedad funcional).**

Es la habilidad de la superficie de pavimento al minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas cuando la superficie esta mojada y para obtener una buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado, en vez de rodar sobre la película de agua en la superficie del pavimento denominado efecto hidropelante, y se puede medir mediante distintos equipos entre los cuales, se pueden mencionar la "Rueda Normalizada" y el "Péndulo Británico" el cual, va a depender de las propiedades de los materiales utilizados (tipo de agregado, granulometría, tipo de ligante y, por otro lado, el grado de compactación de la mezcla).

En conclusión, un buen diseño de pavimentos logra satisfacer todas las especificaciones y condiciones requeridas al menos costo.(MINVU, 2018)

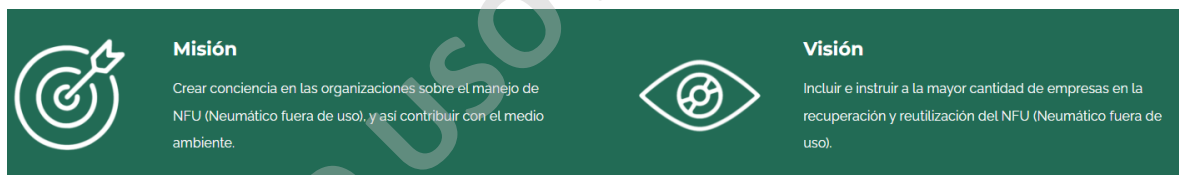
### ***1.3 Sistema de Pavimento Reciclado (SPR)***

El origen del pavimento modificado en base al reciclaje de neumático fue desarrollado por Charles McDonald en Estados Unidos en el año 1960 denominado asfalto ecológico, en donde, él noto que el neumático una vez procesado y estando en su forma plástica, este se

podría utilizar en el asfalto con el propósito de solucionar problemas con la flexibilidad y durabilidad; sin embargo este método no fue utilizado hasta el siglo XX cuando su costo de producción permitió el uso de este de forma económica. Luego en el año 1991 la ley de eficiencia del transporte de superficie de Intermodal (ISTEA) informa sobre la importancia de emplear la goma extraída del reciclaje de neumático en la composición del asfalto, ya que, la mezcla de asfalto recubierto de goma presenta resultados beneficiosos en comparación al asfalto tradicional, en consecuencia, el estado de California lanzo dicha metodología que incorporaba la goma al asfalto para pavimentar, el cual este, lograba reducir las capas bituminosas en un 50% En el año 1997, la agencia de medio ambiente (EA-UK) declaro en publicaciones académicas que se habían consumido cerca de 16.7 millones de toneladas de caucho en dicho año y la reutilización de caucho en el asfalto consumido hasta el año 1990 fue aproximadamente de 1 millón de llantas por año, por ende, la diferencia de cantidades consumidas con respecto a la reutilización de estas era solamente de un 6%, el cual, era muy bajo teniendo en cuenta la gran contaminación que se consumía anualmente. (AMORIM, 2018)

En Chile en el año 2009 se imparte el reciclaje de neumático con la empresa Polambiente, ellos trabajan mediante el proceso de trituración de neumático, en donde, se extraen distintos tamaños de agregados de goma y polvo de caucho, el cual sirve como materia prima para luego fabricar nuevos productos, transformado estos residuos en una solución para contribuir a una economía circular.(Polambiente, 2022).

*Figura 8: Polambiente: Misión y Visión*



*Fuente: Rescatada de Polambiente - [www.polambiente.cl/](http://www.polambiente.cl/)*

Finalmente en el año 2020 la empresa Cirtec junto con Sacyr, marcaron un hito en Chile ya que construyeron la primera obra vial utilizando asfaltos con polvo de neumático a través de un aditivo llamado RARx, dicha obra fue realizada en Santiago de Chile, en Avenida La Florida y Avenida de Cristobal Colón en donde se colocaron dos tramos de 1Km cada uno con mezcla asfáltica de alta viscosidad, este tipo de obras se han realizado en España, México y otros países en donde, la mezcla ha demostrado su potencial, eficiencia ambiental y económica, logrando reducir el espesor del asfalto en más de un 50% causando el aumento de la vida útil del pavimento.(Cirtec, 2020)

Dicho aditivo llamado RARx fue creada por la empresa CIRTEC que se han dedicado al reciclaje de neumáticos con la finalidad de entregarle un nuevo uso luego de ser desechado, con la finalidad de que este aditivo sea utilizado para proyectos viales, en donde, su composición se basa de un 60% de polvo de caucho pretratado, con un 15% de betún asfáltico

y un 25% de agregados de origen mineral. (CIRTEC - Ensayos y documentación técnica mezcla de caucho ( RARx y BMAVC-1), 2022)

Figura 9: Cirtec: Aditivo RARx



Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/rarx-aditivo-con-polvo-de-neumatico/>

### 1.3.1 Pavimento Modificado con Polvo de Caucho

El pavimento modificado con neumático reciclado, al igual que los pavimentos tradicionales, está formado por las distintas capas que componen el paquete estructural ( subrasante, Subbase, Base Estabilizada), en donde, se integra el aditivo llamado polvo de caucho en los betunes para los pavimentos flexibles con la intención de innovar en la construcción de estos, fomentar el reciclaje de neumático y entregarles una mayor durabilidad y resistencias a los pavimentos teniendo en cuenta los métodos de construcción y técnicas para que estos sean capaces de soportar cargas de automóviles y/o personas.

Se han hecho estudios sobre la integración de este elemento reciclado a distintos tipos de pavimientos ya sean de hormigón y asfalto, y es en este último donde nos enfocaremos ya que al haber más carreteras y caminos de asfalto, se abarcaría una mayor cantidad de kilómetros para realizar mejoras a estos, además permitiría continuar con la construcción de pavimentos flexibles con una nueva tecnología, es por esto que, la empresa Española CIRTEC creó un betún llamado RARx compuesto de polvo de caucho en donde este se fabrica in situ mezclándolo por medio de la vía húmeda con el betún asfáltico, para que posteriormente se mezcle con los áridos, por otro lado, también se puede realizar mediante el proceso en seco el cual, a diferencia del proceso húmedo este se mezcla directamente con el betún asfáltico y los áridos al mezclador como si fuera un árido más.(CIRTEC - Betunes Caucho RARx, 2022)

Al igual que los pavimentos tradicionales, la función de estos pavimentos principalmente es soportar y resistir las cargas de los vehículos para que estos puedan transitar de un lugar a otro entregándole una mayor comodidad al conducir, pero a diferencia de los tradicionales el neumático permite eliminar el agua en la interacción entre el neumático y calzada, ya que es

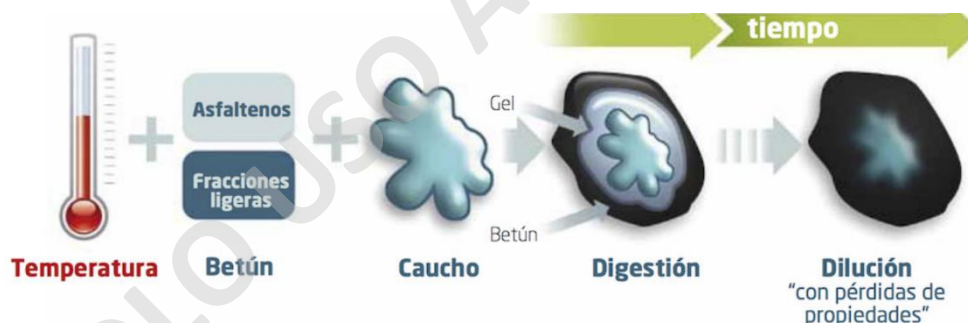
el elemento que se acciona cuando se produce un frenados brusco dándole así una mayor adherencia al pavimento, también soportas los baches y descalces de bermas.

Es por esta razón que mejora las funciones de un pavimento tradicional las cuales son soportar, resistir y distribuir las cargas hacia el pavimento, además de aumentar la capacidad de andar con mayor comodidad sobre el este y ayudar a guiar al vehículo de manera más segura por la carpeta de rodadura en las diferentes condiciones climáticas en donde, finalmente le permite durar a través del tiempo manteniendo sus nivel de prestaciones. (Gerardo Botasso, 2018)

### 1.3.2 Betún Modificado con Polvo de neumático – Cirtec

El método de fabricación de betún modificado que emplea la empresa española Cirtec es mediante el proceso húmedo, en la que se procede a un mezclado inicial de betún convencional con polvo de neumáticos luego de que el neumático como tal, este al final de su vida útil (NFU) y posteriormente el producto resultante de dicha mezcla se somete a un proceso de digestión en el que las partículas de polvo de neumático quedan integradas en la estructura del betún convencional, logrando así modificar las propiedades del mismo. (CIRTEC - Betunes Caucho RARx, 2022)

Figura 10: Proceso de Fabricación del Betún Modificado con Polvo de Caucho



Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/betunes-mejorados-con-polvo-de-neumatico/>

Este proceso de digestión se realiza al interior de un tanque digestor preparado para este cometido, por lo que el betún ya modificado con caucho que se obtiene al terminar el proceso se envía directamente al mezclador de la planta de aglomerado para que, junto con el material pétreo, se pueda fabricar la mezcla final.

El proceso de mezcla por medio de la vía húmeda se diferencia del proceso llamado vía seco, en que por medio de la vía húmeda el caucho se incorpora directamente al ligante tradicional y la mezcla resultante, se mezcla con los materiales pétreos, en cambio, el proceso mediante la mezcla por vía seca, el polvo de neumático se incorpora directamente al mezclador en conjunto con el material pétreo y el betún tradicional como si un árido más se tratara,

provocándose el proceso de digestión del polvo de caucho durante el transporte de la mezcla bituminosa al lugar de colocación de la misma.

Para la fabricación in situ de betunes de polvo de caucho se utilizan equipos específicos ya que, un betún de este tipo el cual, está compuesto por betún asfáltico tradicional y polvo de caucho, en donde, el betún tradicional se almacena en los propios tanques de la fábrica de mezclas bituminosas, mientras que el caucho se almacena en sacos de 1.000kg. El caucho que se emplea es triturado teniendo un tamaño máximo de 0,8mm.

Figura 11 y 12: Betún Asfáltico Modificado con Polvo de Caucho / Polvo de Caucho

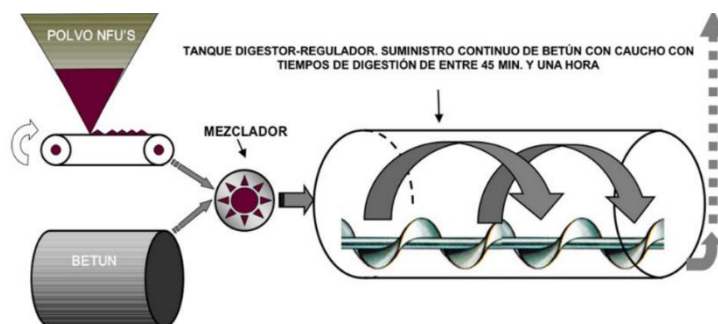


Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/betunes-mejorados-con-polvo-de-neumatico/>

### 1.3.3. Características de los betunes modificados con caucho

Este procedimiento permite un envasado rápido en la planta de trituración de neumáticos, un transporte eficaz y un almacenaje en obra que preserve al caucho de la lluvia gracias a la impermeabilidad de los sacos por parte de la empresa Cirtec. La unidad de fabricación está puesta sobre un semirremolque, el cual se puede desplazar e instala en la central de fabricación de mezclas bituminosas. Una vez estacionada, la cabeza tractora puede marcharse, quedando sólo el semirremolque portando la unidad de fabricación de la mezcla.

Figura 13 y 14: Proceso de Mezcla entre el polvo de NFU y Betún Asfáltico. / Máquina Mezcladora





*Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/betunes-mejorados-con-polvo-de-neumatico/>*

Una vez que la unidad de mezclado se ha estacionado, se procede a conectar con el suministro de betún asfáltico desde los tanques de la planta de fabricación de mezclas bituminosas, se carga el camión tolva de caucho, y a través de una cinta transportadora incorporada dentro del equipo la cual está dotada de un sistema automático de dosificación por peso solicitado, en donde se alimenta con caucho al mezclador. Finalmente, el betún modificado recién fabricado para a un tanque de digestión-regulación.

Por otro lado, es importante aclarar que el betún con caucho modificado no entra en ningún momento en los tanques de la central de fabricación, que se limitan a suministrar el betún puro a la unidad de mezclado, desde donde se bombea directamente el ligante ya modificado hasta el mezclar de la planta de fabricación de mezcla bituminosa, por ello, con este sistema es imposible que los tanques de la central de fabricación sufran algún daño producto de la integración de polvo de neumático.

Desde este tanque se sirve el betún ya modificado con polvo de caucho a la planta de fabricación de mezclas, al ritmo que ésta lo va demandando, para ello, la salida del tanque digestor-regulador está capacitado para la exigencias solicitadas, en donde este se acopla a la tubería de betún que transporta habitualmente el ligante hasta el mezclador en donde, la propia unidad de mezclado cuenta con una bomba que impulsa el ligante a través de dicha tubería controlado desde la central de fabricación.

Como ya sabemos, existe un betún modificado con polvo de caucho llamado RARx que se integra a la mezcla con agregados naturales para dar como resultado el asfalto modificado por medio de la vía húmeda creado por la empresa CIRTEC, pero existen distintos tipos de betunes creador por CIRTEC, entre ellos están:

- PMB 45/80 60 C
- PMB 45/80 65 C
- BC 35/50
- BC 50/70
- BMAVC-1

(CIRTEC - Betunes Caucho RARx, 2022)

El cual, será este último el que analizaremos para ver sus características estructurales en conjunto con el betún principal RARx.

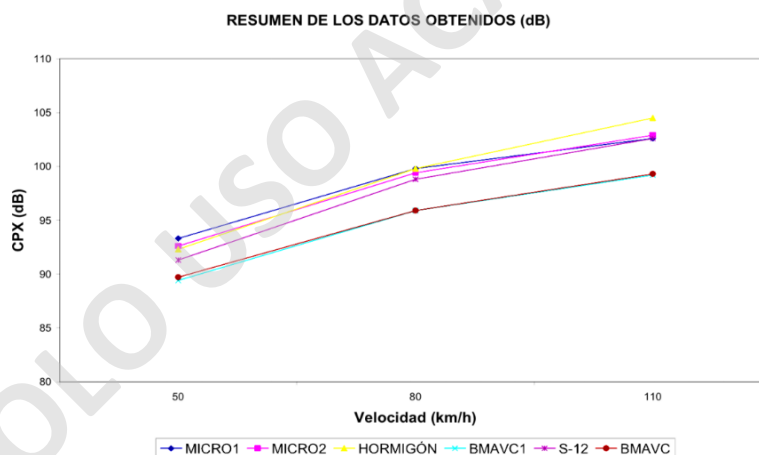
### 1.3.4 Características de las mezclas con RARx y BMAVC-1:

La empresa Cirtec realizó diferentes ensayos a las mezclas de asfalto modificados para ver su comportamiento y posteriormente poder compararlos con muestras de betunes de asfaltos tradicionales, los cuales son (CIRTEC - Ensayos y documentación técnica mezcla de caucho (RARx y BMAVC-1), 2022):

- **Reducción de Ruido**

Estas mezclas tienen un efecto favorable ya que produce un bajo nivel sonoro entregándole comodidad al conductor reduciendo el cansancio y mejorando la seguridad de este, en donde la disminución del nivel acústico entre 3 y 5dB, logrando incluso en algunos casos una disminución de nivel sonoro mayor.

Gráfico 3: Ensayo de reducción de ruido entre muestras con betún de asfalto modificado y tradicional.



Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ensayos-y-documentacion-tecnica-mezclas-con-caucho.pdf>

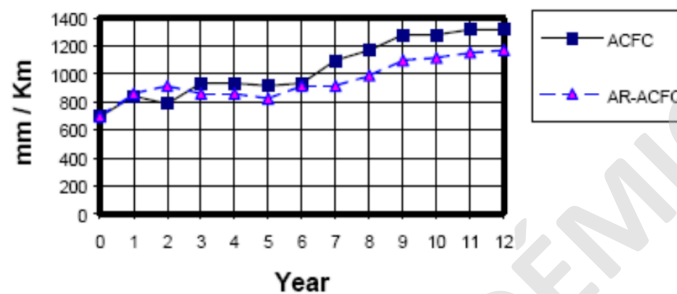
- **Macro textura**

La elevada consistencia del betún BMAVC-1 propicia que la postcompactación debida al tráfico sea mínima y esta mantenga el valor de macro textura durante años, en donde, en la obras ejecutadas por Cirtec para autovías y autopistas se consiguen círculos de arena superiores a 1,5 el cual permite que el vehículo obtenga mayor resistencia al deslizamiento.

- **Regularidad Superficial Longitudinal (IRI)**

La mezcla AR-ACFC, proveniente del betún BMAVC-1, en comparación con el betún convencional (ACFC) obtuvo mejor rendimiento en la evolución de coeficiente de rozamiento de capas de rodadura, esto se tribuye a que la mezcla modificada con caucho presenta una alta resistencia a la fisuración y otros deterioros superficiales a través de los años.

Gráfico 4: Ensayo de Regularidad Superficial Longitudinal IRI entre muestras con betún de asfalto modificado y tradicional.



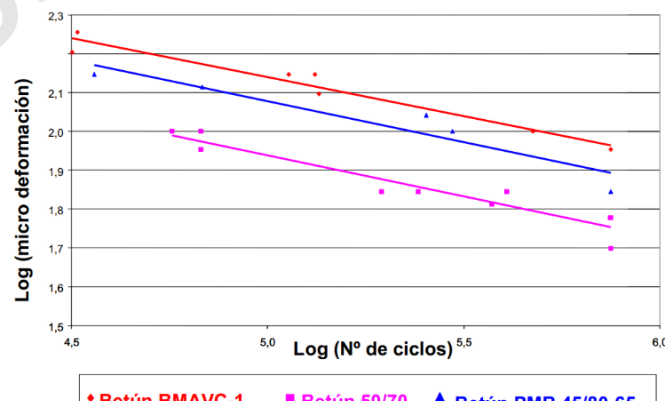
Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ensayos-y-documentacion-tecnica-mezclas-con-caucho.pdf>

- **Capacidad Estructural**

Las mezclas fabricadas con BMAVC-1 presentan mayor durabilidad debido a su alto contenido de ligante (9% a 10% en peso) así como una elevada resistencia a la fatiga y en general a la fisuración.

Estas propiedades unidas a la impermeabilidad incluso en capas delgadas protegen el pavimento subyacente limitando su deterioro y minimizando el empeoramiento de las deflexiones en con tiempo.

Gráfico 5: Ensayo de Fatiga entre muestras con betún de asfalto modificado y tradicional.



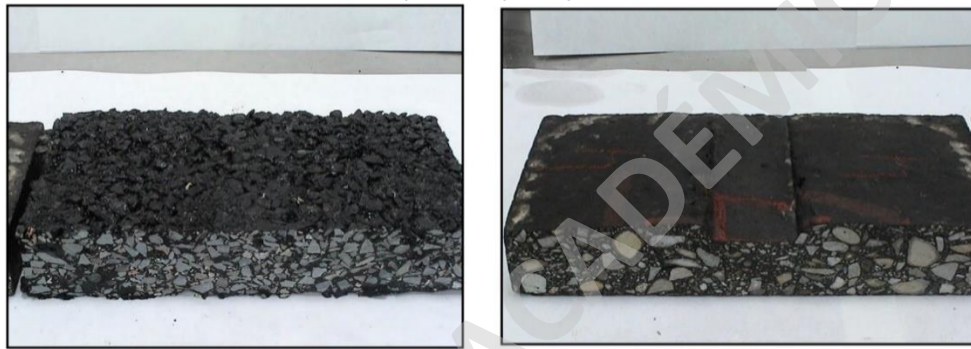
Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ensayos-y-documentacion-tecnica-mezclas-con-caucho.pdf>

- **Regularidad Transversal (Deformaciones y ahuellamientos)**

Los resultados obtenidos del ensayo de Pista de laboratorio (NLT-173) muestran la enorme resistencia de la mezcla de las deformaciones plásticas, esta característica se le atribuye tanto a la elevada viscosidad del ligante como al esqueleto mineral que posee la mezcla, en donde, es una de las mejores características de las mezclas bituminosas modificadas.

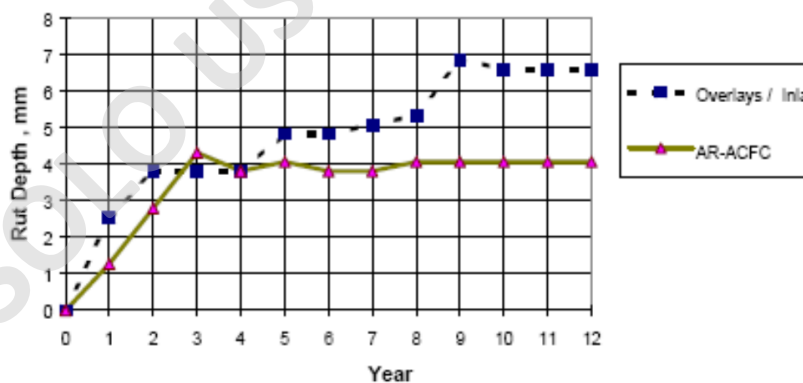
Esto se puede evidenciar en el grafico el cual presenta una evolución de roderas a lo largo de 12 años de vida de servicio:

Figura 15: Muestras de Deformaciones y Ahuellamientos de Ensayo de Regularidad Transversal entre muestras con betún de asfalto modificado y tradicional.



Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ensayos-y-documentacion-tecnica-mezclas-con-caucho.pdf>

Gráfico 6: Ensayo de Regularidad Transversal entre muestras con betún de asfalto modificado y tradicional.



Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ensayos-y-documentacion-tecnica-mezclas-con-caucho.pdf>

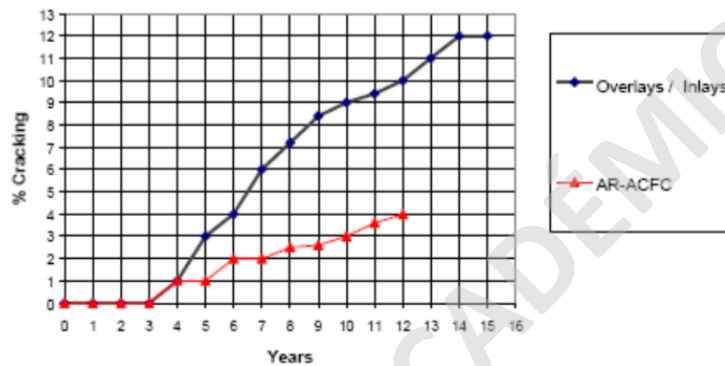
- **Fisuración y otros deterioros superficiales**

La principal causa de la fisuración en firmes flexibles es la reflexión de las fisuras desde las capas inferiores en los refuerzos y recrecimientos, es por esto que, el elevado contenido de ligante que contiene la mezcla y sus características intrínsecas, las mezclas fabricadas con BMAVC-1 (AR-ACFC) forman una verdadera capa protectora de fisuras, además, tampoco

es probable que aparezcan fisuras por fatiga de la propia capa que se coloca, ya que su flexibilidad le confiere una larga vida útil.

Por último, su resistencia al envejecimiento hace que se conserve durante años sus buenas características iniciales, lo que evita que se provoquen deterioros superficiales, en donde se presenta un gráfico que presenta la evolución de fisuramiento (% de grietas) durante 12 años de vida de servicio con respecto a un pavimento convencional.

Gráfico 7: Ensayo de Fisuración y otros deterioros superficiales entre muestras con betún de asfalto modificado y tradicional.

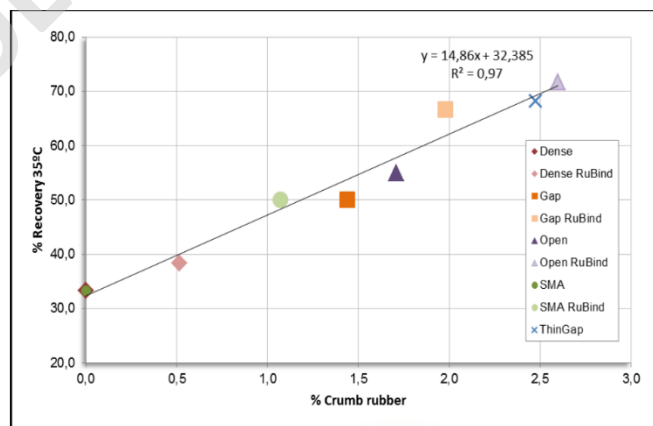


Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ensayos-y-documentacion-tecnica-mezclas-con-caucho.pdf>

### • Ensayo a Torsión.

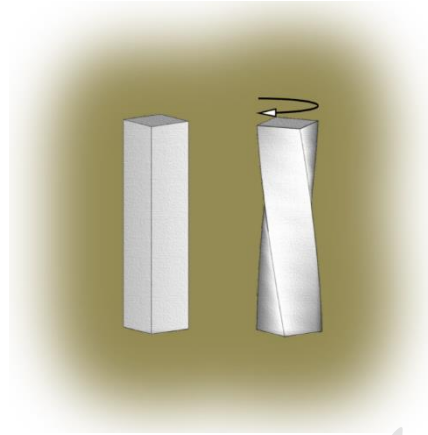
Las mezclas con alto contenido de RARx (ThinGap) presentan los mejores valores de recuperación en el ensayo de torsión en comparación a otras mezclas convencionales y otras mezclas con otro tipo de ligante con distintas cantidades de polvo de neumático. (CIRTEC - Ensayos y documentación técnica mezcla de caucho (RARx y BMAVC-1), 2022)

Gráfico 8: Ensayo a Torsión entre muestras con betún de asfalto modificado y tradicional.



Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ensayos-y-documentacion-tecnica-mezclas-con-caucho.pdf>

*Figura 16: Simulación de Ensayo a Torsión*



*Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ensayos-y-documentacion-tecnica-mezclas-con-caucho.pdf>*

## **2.0 Caracterización global de cada sistema de pavimentación considerando su dimensión ambiental.**

### **2.1 El Cambio climático y el Medio Ambiente**

Hoy en día, el cambio climático es un tema importante a nivel mundial, este se percibe en el día a día con las altas temperaturas que eran poco inusuales o inesperadas hace unas décadas atrás en donde, cada país trabaja constantemente para lograr mejorar el medio ambiente en el que vivimos. Día a día se desechan grandes cantidades de plástico y/o basura en conjunto de otros desechos altamente contaminantes como lo son las baterías, aceites y neumáticos que impactan gravemente al medio ambiente. Además, se le suma la generación de los Gases de Efecto Invernadero (CO<sub>2</sub>) provocadas por automóviles, quema de madera incluso, hasta el mismo ser humano, que impactan gravemente en la capa de ozono del planeta provocando que esta, se debilite y aumente la temperatura, provocando incendios y sequías que afectan la flora y fauna del planeta, además, sin dejar de lado el comercio de la ganadería de cada país. (Reporte del Estado del Medio Ambiente - M.M.A., 2022)

Es por esto que, en el año 2015 se realizó la Cumbre COP21 con sede en París, Francia con la finalidad de lograr un acuerdo para combatir el cambio climático, el cual llegaron a participar 195 países provenientes de los todos los continentes del planeta, en donde, finalmente se terminó con la adopción del Acuerdo de París, este estableció el Marco Legal de la lucha contra el cambio climático a partir del año 2020 tratándose de un acuerdo histórico para combatir el cambio climático entre todos los países involucrados en donde Chile, esta adherido a la causa. (Nicolas Godoy Aranda, 2019).

Las emisiones totales de la Generación de Efecto Invernador (GEI) del país se han duplicado desde 1990 a la actualidad pero, desde el año 2016 se ha registrado una desaceleración en las emisiones de carbono, en la última medición realizada en el año 2018 se totalizaron 112,3 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> incrementándose en solo un 2% desde 2016 en donde, la generación de energía de emisiones de GEI son provocado principalmente por la quema de combustibles fósiles llegando a tener un 77% del total. Por otro lado, el uso de energías renovables (solar, eólica, hídrica, geotérmica) además de la reducción de termoeléctricas a carbón, logran un impacto positivo en el país logrando la desaceleración de emisiones de CO<sub>2</sub> de los últimos años además de los últimos avances en electromovilidad que aportaran a la reducción de emisiones en los automóviles futuros.(Reporte del Estado del Medio Ambiente - M.M.A., 2022)

Según el reporte del Estado del Medio Ambiente para el año 2021 hecho por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile, en el ámbito del cambio climático, el país tiene un bajo aporte en la disminución de GEI, siendo un 0,24% del total de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, sin embargo, en el país han surgido compromisos ambiciosos de reducción y adaptación, con el propósito de alcanzar la meta de reducción de carbono para el año 2050.(Reporte del Estado del Medio Ambiente - M.M.A., 2022)

En donde dichos compromisos han empezado a dar pequeños frutos ya que, los últimos años (2016-2020), la emisiones de termoeléctricas del país reportan una tendencia a la baja en los tres principales elementos contaminantes, estos son: dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y material particulado (MP), además, se destaca una fuerte caída de las emisiones de SO<sub>2</sub> en las fundiciones de cobre. (Reporte del Estado del Medio Ambiente - M.M.A., 2022).

Es por esta misma razón que existe la Ley 21.368 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (antigua 19.330) en donde, el art.1 de la ley declara que: *"el derecho de vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental se regularán por las disposiciones de esta ley, sin perjuicio de lo que otras normas legales establezcan sobre la materia"*,

En donde se definen dos principales términos los cuales son:

- Medio Ambiente: *"Sistema global constituido por elementos naturales y artificiales de naturaleza física, química o biológica, socioculturales y sus interacciones, en permanente modificación por la acción humana o natural y que rige y condiciona la existencia y desarrollo de la vida en sus múltiples manifestaciones"*(Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1994)
- Cambio Climático: *"Cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altere la composición de la atmosfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables"*.(Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1994)

Esto quiere decir que, los seres humanos somos tan capaces como el mismo medio de cambiar nuestro entorno al punto de perjudicarlo y disminuir nuestra expectativa de vida hacia el futuro, es por esto que, dentro de todas las industrias contaminadoras existentes en el país, la construcción en nuestro país está considerada una de las más contaminadoras del medioambiente ya que genera grandes cantidades de CO<sub>2</sub> al ejecutar sus obras, es por esto que son tomadas en cuenta integrándolas al medio ambiente en el que vivimos, ya que este es un ente que puede influir y modificar a los demás componentes del medio y producir un grave cambio si no se controlan sus maneras de ejecutar trabajos. (Ministerio de Obras Públicas - Dirección de Vialidad, 2020)

Por ende, a la hora de construir una obra vial se debe tener en cuenta el cuidado hacia el medio ambiente y el bienestar de la biodiversidad existente en el lugar, ya que se puede cambiar el ecosistema y, en consecuencia, afectar al mundo en el que vivimos.

### ***2.1.1 Lineamientos Ambientales en la Dirección Vial***

Dentro de la Construcción, está el área de las construcciones viales y existen lineamientos ambientales los cuales la dirección de Viabilidad del país encuentra pertinente integrar en cada uno de los proyectos viales que se realicen para no provocar un impacto ambiental que perjudique la vida de la flora y fauna, estos son:

- Adherir y promover las políticas gubernamentales referidas al medioambiente.
- Generar procedimientos, directrices y lineamientos que permitan dar cumplimiento de la legislación ambiental del país.
- Incorporar la gestión ambiental a la totalidad de las etapas de los proyectos de infraestructura vial.
- Contribuir a la mejora de los diseños y productos viales, haciéndolos más armónicos con el entorno y rescatando las particularidades de las áreas donde se insertan.
- Promover la incorporación de tecnologías sustentables en las obras de infraestructura vial, de manera de disminuir los riesgos de contaminación e impactos de daños hacia el medio ambiente.
- Manejar adecuadamente los residuos producidos por la ejecución de nuevas obras, favoreciendo la reutilización, reciclaje o neutralización de estos.
- Realizar acciones para el mejoramiento continuo de la gestión ambiental de la Dirección Vial.

Estos lineamientos ayudaran a los entes públicos y empresas privadas encargadas de ejecutar obras viales, a realizar trabajos de manera sustentable y pro-medioambiente con el fin de no dañar el ecosistema en el que vivimos. (Ministerio de Obras Públicas - Dirección de Vialidad, 2020)

### ***2.1.2 Impactos Ambientales asociados a la construcción de una red vial.***

En la actualidad conseguir un equilibrio entre el medio ambiente, la sociedad y la economía está considerado como algo esencial para satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de futuras generaciones en donde, el desarrollo sostenible se consigue gracias al equilibrio de los tres pilares de sostenibilidad.

La ISO 14001 – 2015, proporciona a las organizaciones un marco con el que proteger el medio ambiente y responder a las condiciones ambientales cambiantes, siempre guardando el equilibrio con las necesidades socioeconómicas.

En esta se aprecian los aspectos ambientales relevantes que ayudan a cuidar el medio ambiente, en donde, existen por ejemplo residuos peligrosos como lo son las baterías y los neumáticos. Este último puede causar impactos ambientales gravísimos, estos son:

- Contaminación de suelo y aguas subterráneas
- Daños en el entorno natural como en flora y fauna de la zona
- Los daños a la salud humana
- La pérdida de valor económico del suelo

Pero no tan solo son residuos los que llegan a contaminar el medio ambiente, sino que la construcción de una red vial puede generar los impactos mencionados además todo lo que conlleva a ejecutar una obra (Escuela Europea de Excelencia ISO 14001:2015, 2016)

### ***2.2 Sistemas de Pavimentación Flexible Tradicional y el Medio Ambiente***

Para ejecutar una obra de pavimentación, se necesitan realizar diferentes partidas, en donde, cada una de ellas produce una contaminación hacia el medio ambiente expulsando distintos cantidades de CO<sub>2</sub> al aire que son provocados por mismas personas y maquinarias, pero también luego de que esta sea puesta en servicio, necesitara realizarle reparaciones a través del tiempo, en consecuencia, las emisiones de CO<sub>2</sub> seguirán aumentando indefinidamente. Algunas de las actividades principales en la fase de construcción de Pavimentos Flexibles Tradicionales son (Beltrán et al., 2021):

- Movimiento de Tierras y limpieza de vegetación.
- Instalación de Faenas tanto para personas como equipamiento y maquinarias.
- Construcción de calzada: Colocación de subbase, base estabilizadora, carpeta asfáltica.
- construcción de obras complementarias: cunetas, muros, otros.
- Movimiento de maquinarias.
- Transporte de materiales pétreos y áridos.

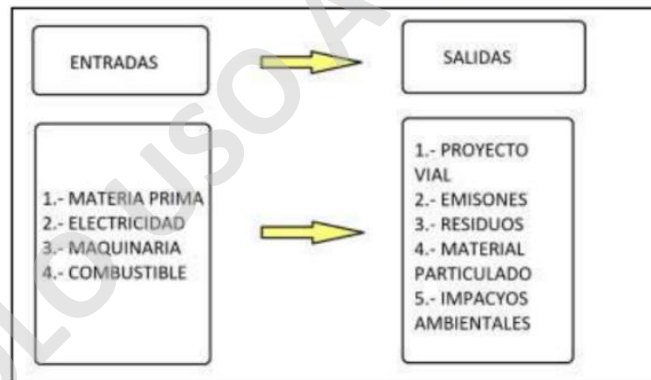
En cambio, las actividades en la fase de mantenimiento de Pavimentos Flexibles Tradicionales son:

- Instalación de Faenas.
- Mantenimiento de calzada y obras complementarias.
- Movimiento de vehículos y maquinarias.
- Transporte de materiales pétreos y áridos.

En donde, todas estas actividades tienen un grado de emisión de CO<sub>2</sub> que afecta directamente al medio ambiente y, por ende, aumenta las probabilidades de que afecte aún más al cambio climático.

Como se puede apreciar en el siguiente cuadro, todo lo necesario para realizar una obra de pavimentación se necesita de materia prima, maquinarias, electricidad, combustible y teniendo en cuenta además al personal a cargo de ejecutar la obra que, en donde, se transforma y tiene como resultado el proyecto vial terminado sumándole las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por los trabajos, maquinarias y personas, Residuos, Material particulado e Impactos Ambientales perjudiciales para el medio ambiente.

Tabla 3: Actividades contaminantes (entrada y salidas)  
 Selección de entradas y Salidas



Fuente: Rescatado del Estudio del Análisis de la Huella de Carbono en Vías de Pavimentos Flexibles Tradicionales -  
 file:///C:/Users/esteb/Downloads/1927-Texto%20del%20art%C3%ADculo-8840-1-10-20211104%20(1).pdf

Según un estudio realizado en Ecuador sobre el Análisis de la huella de carbono en vías de pavimentos flexibles tradicionales, analizaron distintas variables de impactos ambientales tanto en la etapa de construcción como en la de mantenimiento. Este proyecto contaba con un tramo de 36 km. en donde se analizaron todos los impactos involucrados para analizar sus emisiones de CO<sub>2</sub> por tramos de 1km., y observar cuáles eran los agentes más contaminadores hacia el medio ambiente a la hora de ejecutar una obra, en donde se obtuvo que:

Tabla 4: Impactos Ambientales que se encuentran en las Etapas de Construcción y Mantenimiento de un Pavimento Asfáltico.

*Impactos ambientales por categoría de impacto. Resultado referido a la unidad funcional: 1 Km de carretera*

| IMPACTOS AMBIENTALES                | UNIDAD                | ETAPA        |               | TOTAL     |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------|---------------|-----------|
|                                     |                       | CONSTRUCCION | MANTENIMIENTO |           |
| ACIDIFICACIÓN TERRESTRE             | kg SO <sub>2</sub> eq | 5.60         | 12.54         | 18.14     |
| AGOTAMIENTO DE AGUA                 | m <sup>3</sup>        | 4.10         | 5.88          | 9.98      |
| AGOTAMIENTO DE METALES              | kg Fe eq              | 30.27        | 356.12        | 386.39    |
| AGOTAMIENTO DE OZONO                | mg CFC-11 eq          | 132.54       | 355.70        | 488.24    |
| AGOTAMIENTO FÓSIL                   | kg oil eq             | 318.10       | 674.45        | 992.55    |
| CAMBIO CLIMÁTICO                    | kg CO <sub>2</sub> eq | 982.13       | 2006.74       | 2988.87   |
| ECOTOXICIDAD DE AGUA DULCE          | kg 1,4-DB eq          | 3.10         | 23.43         | 26.53     |
| ECOTOXICIDAD TERRESTRE              | kg 1,4-DB eq          | 0.52         | 1.56          | 2.08      |
| EUTROFIZACIÓN DE AGUA DULCE         | g P eq                | 51.67        | 378.2         | 429.87    |
| FORMACION DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS | kg NMVOC              | 4.79         | 11.42         | 16.21     |
| MATERIAL PARTICULADO                | kg MP10 eq            | 50.64        | 802.45        | 853.09    |
| OCUPACION DE SUELO AGRICOLA         | ha*a                  | 3.87E-03     | 9.89E-03      | 0.01376   |
| OCUPACION DE SUELO URBANO           | ha*a                  | 5.92E-04     | 1.94E-03      | 0.002532  |
| RADIACIÓN IONIZANTE                 | kBq U235 eq           | 58.00        | 153.59        | 211.59    |
| TRANSFORMACION DE TERRENO NATURAL   | ha                    | 3.11E-05     | 8.23E-05      | 0.0001134 |
| TOXICIDAD HUMANA                    | kg 1,4-DB eq          | 74.6         | 683.51        | 758.11    |

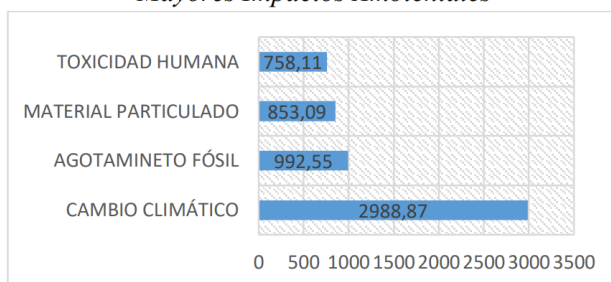
Fuente: Rescatado del Estudio del Análisis de la Huella de Carbono en Vías de Pavimentos Flexibles Tradicionales - file:///C:/Users/esteb/Downloads/1927-Texto%20del%20art%C3%ADculo-8840-1-10-20211104%20(1).pdf

Como se puede observar en la tabla de Impactos Ambientales por categoría de impacto realizada en Ecuador por cada Km. construido de carretera, se puede analizar que existen cuatro impactos ambientales que aportan grandes cantidades de CO<sub>2</sub> al medio ambiente, las cuales son:

- La toxicidad humana: Aportando una cantidad de 758,11kg., siendo provocada por la fabricación de asfalto y las emisiones que, al momento de ser vaciado en la obra, producen la llamada toxicidad humana el cual, conlleva a que estos tengan problemas de salud
- Material particulado: Aportando una cantidad de 853,09 kg., siendo emitido por los movimientos de tierras y maquinarias provocando enfermedades respiratorias a las personas y animales.
- El agotamiento fósil aporta con 992,55 kg., provocado por las actividades de intervención y maquina utilizada produciendo la quema de combustibles el cual produce dióxido de carbono logrando un incremento considerable en el calentamiento global.
- Cambio climático: Aporta una cantidad de 2988,87 kg. de CO<sub>2</sub>, siendo este el principal impacto ambiental provocado por la ejecución de una vía de asfalto, e donde todos los Gases de Efecto Invernadero (GEI) producidos en obra gracias a la intervención humana produce el cambio climático.

Gráfico 9: Principales Impactos Ambientales en la Construcción y Mantenimiento de un Pavimento

*Mayores Impactos Ambientales*



Fuente: Rescatado del Estudio del Análisis de la Huella de Carbono en Vías de Pavimentos Flexibles Tradicionales - file:///C:/Users/esteb/Downloads/1927-Texto%20del%20art%C3%ADculo-8840-1-10-20211104%20(1).pdf

En conclusión, una ejecución de una obra vial hecha de asfalto produce grandes cantidades de CO<sub>2</sub> que afectan gravemente al medio ambiente (Beltrán et al., 2021).

### 2.3 Sistema de Pavimentación Reciclado (NFU) y el Medio Ambiente

El betún modificado con polvo de caucho RARx, que se integra a la mezcla con agregados naturales para dar como resultado el asfalto modificado por medio de la vía húmeda creado por la empresa CIRTEC, estos betunes cumplen con la normativa del Pliego General de Carreteras (PG3) y la Orden Circular 21/2007 del Gobierno de España (CIRTEC - Betunes Caucho RARx, 2022), este tipo de betún cuenta con una autodeclaración ambiental conforme con la ISO 14021 y la normal UNE-EN 15804 para ser utilizado como aditivo para la construcción de obras viales. (Cirtec - Autodeclaración ambiental aditivo RARX®, 2020)

En dicha autodeclaración se señala que Cirtec ofrece sus productos a todas las empresas o Administradores públicos para utilizar sus productos ya que utilizan material reciclado aportando hacia la economía circular de manera sustentable en pro hacia el medio ambiente, con ello, se innova aportando soluciones técnicas para las mezclas asfálticas basadas en el empleo de productos (polvo de caucho) obtenidos a partir de la reutilización de neumáticos (NFU) y otros productos derivados del residuo.

Cirtec se ha transformado en una de las entidades adheridas al "Pacto por una economía circular impulsado por el gobierno Español, en donde, aprovechar el polvo de caucho de neumático es primordial para producir mezclas asfálticas de las más altas prestaciones, siendo sostenibles económicamente, ayudando a reducir los residuos generados por la sociedad (neumáticos) y generando, a través de sus actividades y proyectos de calidad.

RARx es un producto de alta tecnología fabricado a partir de polvo de caucho (60% de su composición) pretratado con betún y otros aditivos de origen mineral para su uso de las mezclas asfálticas, en donde este producto está acreditado por las normas ISO 9001:2015 e 14001:2015.

- Descripción técnica del Producto

Tabla 5: Descripción del Producto RARx

|                                  |                                        |
|----------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Estado físico</b>             | <b>Sólido, polvo gris oscuro</b>       |
| <b>Olor y apariencia</b>         | Grano fino, gránulos grisáceos         |
| <b>Densidad aparente</b>         | 0.6 [ $\pm$ 0.03] gr/cm <sup>3</sup>   |
| <b>Peso Específico</b>           | 1.031 gr/cm <sup>3</sup> [ $\pm$ 0.03] |
| <b>Punto de Inflamación [°C]</b> | > 300 (grados centígrados)             |
| <b>Solubilidad</b>               | Insoluble en agua                      |
| <b>Estabilidad química</b>       | Incompatible como oxidante fuerte      |

Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ADAP-ADITIVO-RARX-V2.pdf>

- La composición de 1 ton. de aditivo para mezclas asfálticas RARx es:

Tabla 6: Composición de la Mezcla RARx

| <b>Materiales RARX®</b>  | <b>% en peso total</b> |
|--------------------------|------------------------|
| Polvo de NFU             | 60%                    |
| Betún                    | 16% ( $\pm$ 3%)        |
| Filler calizo y aditivos | 24% ( $\pm$ 3%)        |

Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ADAP-ADITIVO-RARX-V2.pdf>

- Garantiza la calidad final del producto y la digestión de las partículas de polvo de caucho al realizar dicho proceso en origen (vía húmeda).
- Aprovecha la sencillez y versatilidad de empleo en las plantas de fabricación de mezclas asfálticas al incorporarse en el proceso de producción de dichas mezclas como un aditivo o árido fino más (vía seca).
- Y finalmente no tiene ningún tipo de pigmento o teñido, ni materiales o sustancias peligrosas que puedan afectar la salud de las personas y al medio ambiente, que puedan ser cancerígenas, mutagénicas o tóxicas. (Cirtec - Autodeclaración ambiental aditivo RARX®, 2020)

Es por esta razón que Cirtec realizó un “Estudio de análisis de ciclo de vida comparativo de rehabilitación de firmes de hormigón entre las mezclas asfálticas convencionales y mezcla asfáltica con aditivo RARx”, este se realizó en México para el Proyecto de la Autopista de Pirámides a Tulancingo, el cual está conforme con la ISO 14021 y la UNE -EN 15804.

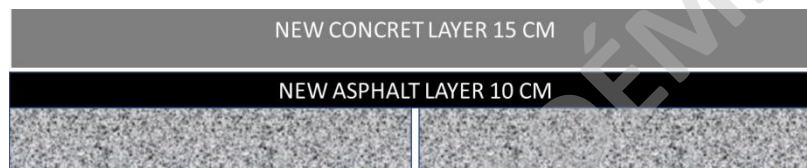
Este proyecto comprende la rehabilitación, mantenimiento y conservación por un periodo de 10 años de 91,5 km. de carretera entre Pirámides, Tulancingo y Pachuca. El proyecto contaba con diferentes tipologías constructivas, debido a las conservaciones anteriores llevadas a cabo

las cuales era (CIRTEC: Estudio de análisis de ciclo de vida comparativo de rehabilitación entre mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con aditivo RARx., 2020):

- Tramos de Asphalt Concret (AC).
- Tramos de AC debajo de losas de hormigón.
- Tramos de losas de hormigón.

Pero antes de que Cirtec propusiera este aditivo como opción para este proyecto, el ministerio de México propuso una idea de rehabilitación, el cual consistía en colocar una capa de firme flexible de 10cm de espesor sobre las antiguas tipologías de losas de hormigón para evitar el ascenso de las fisuras existentes hacia una nueva capa superior hecha de hormigón de 15 cm. de espesor.

*Figura 17: Primera opción para la rehabilitación de la Autopista Pirámides-Tulango (Ministerio de México)*



Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ACV-COMPARATIVA-MEZCLAS-ASFALTICAS-DE-REHABILITACION.pdf>

Luego, la empresa Sacyr planteó una segunda opción para la rehabilitación de la autopista el cual consistía en un tratamiento bicapa de aglomerado, es decir, con una primera capa de 13cm. de espesor que sirve de barrera al reflejo de fisuras en las losas de hormigón antiguas y sobre ella una segunda capa de rodadura mediante el uso de betunes modificados a base de polímeros.

Dicha mezcla superior modificada a partir de polímeros tiene un porcentaje de 5% de betún modificado. En cuanto al mantenimiento de la carretera, se requiere un fresado y reasfaltado al 5to año de servicio, ya que se prevé la aparición de fisuras a pesar del alto espesor.

*Figura 18: Segunda opción para la rehabilitación de la Autopista Pirámides-Tulango (Sacyr)*



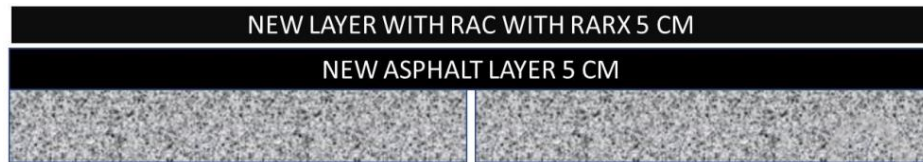
Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ACV-COMPARATIVA-MEZCLAS-ASFALTICAS-DE-REHABILITACION.pdf>

Y finalmente la última solución fue integrando el aditivo RARx por parte de la empresa Cirtec, en donde consistía en realizar una capa inferior de 5cm de regularización y corrección

del Índice de Regularidad Superficial (IRI) y sobre ella una capa de 5cm. de la mezcla anti-fisuras con RARx.

Esta solución según el estudio garantiza una vida útil por encima de los 10 años, periodo por el cual se realiza el estudio de ciclo de vida.

Figura 19: Tercera opción para la rehabilitación de la Autopista Pirámides-Tulango (Cirtec)



Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ACV-COMPARATIVA-MEZCLAS-ASFALTICAS-DE-REHABILITACION.pdf>

En donde la composición de cada una de las mezclas asfálticas estudiadas es:

Tabla 7: Composición de las mezclas asfálticas estudiadas

| Mezcla                                                              | Composición                             |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Mezcla asfáltica convencional para capa de rodadura                 | 20 % de árido 12-19                     |
|                                                                     | 23 % de árido 6-12                      |
|                                                                     | 57 % de arena 0-6                       |
|                                                                     | 5,3 % de Betún PG76-22 sobre agregados  |
|                                                                     | 5,5 % de Betún PG64-22 sobre agregados  |
| Mezcla asfáltica de alta viscosidad con RAR-X para capa de rodadura | 12 % de árido 12-19                     |
|                                                                     | 46 % de árido 6-12                      |
|                                                                     | 42 % de arena 0-6                       |
|                                                                     | 2,73 % de RAR-X sobre agregados         |
|                                                                     | 7,05 % de Betún PG64-22 sobre agregados |

Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ACV-COMPARATIVA-MEZCLAS-ASFALTICAS-DE-REHABILITACION.pdf>

El objetivo de este estudio hecho por Cirtec, es disponer información sobre la huella Ambiental:

- Del polvo de neumático procedente de neumáticos fuera de uso
  - Del aditivo para mezclas asfálticas RARx fabricado a partir de polvo de caucho
  - Comparativa de mezclas asfálticas
1. Sistema Constructivo Convencional:
    - 13 cm. de mezcla asfáltica densa con contenido bajo en ligante
    - 5cm. de mezcla asfáltica con betún modificado (polímeros) PMB 45 80/65
  2. Sistema Constructivo Mezcla Anti-fisuras con RARx:
    - 5cm. de mezcla asfáltica densa con contenido bajo en ligante
    - 5cm. de mezcla asfáltica anti-fisuras con uso de RARx
- Análisis y cuantificación comparativa de soluciones.

Para este estudio se ha utilizado la metodología ILCD 2011 Midpoint+, que es la propuesta por la Unión Europea para la huella ambiental, facilitando los valores obtenidos para las 16 categorías de Impacto Ambiental que contine que afecta al cambio climático, en donde estos son:

Tabla 8: Categoría de Impactos Ambientales en la rehabilitación de las Autopista Pirámides – Tulango

En donde se puede visualizar que al igual que los pavimentos flexibles tradicionales se analizan las mismas categorías de impactos ambientales con respecto al estudio realizado en Ecuador con respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub> producido por el asfalto, en donde, el cambio climático, la Toxicidad Humana, el agotamiento fósil y el material particulado también son factores para analizar en este estudio de emisiones de CO<sub>2</sub> hacia el medio ambiente.

| Categoría de impacto                     | Unidad                  |
|------------------------------------------|-------------------------|
| Climate change                           | kg CO <sub>2</sub> eq   |
| Ozone depletion                          | kg CFC-11 eq            |
| Human toxicity, non-cancer effects       | CTUh                    |
| Human toxicity, cancer effects           | CTUh                    |
| Particulate matter                       | kg PM <sub>2.5</sub> eq |
| Ionizing radiation HH                    | kBq U235 eq             |
| Ionizing radiation E (interim)           | CTUe                    |
| Photochemical ozone formation            | kg NMVOC eq             |
| Acidification                            | molc H <sup>+</sup> eq  |
| Terrestrial eutrophication               | molc N eq               |
| Freshwater eutrophication                | kg P eq                 |
| Marine eutrophication                    | kg N eq                 |
| Freshwater ecotoxicity                   | CTUe                    |
| Land use                                 | kg C deficit            |
| Water resource depletion                 | m <sup>3</sup> water eq |
| Mineral, fossil & ren resource depletion | kg Sb eq                |

Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ACV-COMPARATIVA-MEZCLAS-ASFALTICAS-DE-REHABILITACION.pdf>

Una vez realizado el estudio, quedo demostrado que para la construcción de un pavimento empleando mezclas asfálticas fabricadas con el aditivo RARx para la capa de rodadura de espesor de 5cm en conjunto con una capa intermedia de asfalto del mismo espesor (5cm.) provoca un impacto global menor que los construidos con la capa de rodadura convencional de 5cm. de espesor en conjunto con una capa intermedia de 13cm del asfalto convencional, debido, principalmente, a dos factores:

- La capa de rodadura que emplea RARx permite su instalación sobre una capa intermedia de menor grosor, únicamente 5cm. en comparación a los 13 cm. necesarios en el caso de la capa de rodadura convencional.
- El empleo del aditivo RARx evita la necesidad de actuar a los 5 años para restaurar el firme, de modo que no hay un consumo de materias primas ni de energías adicional al cabo de ese periodo.

Tabla 9: Resultados obtenidos sobre la cantidad de Material Particulado Total (mPt) entre las muestras para la rehabilitación de la Autopista Pirámides Tulango

| Proceso evaluado                                                                        | Impacto total (mPt)            |                              | Climate change (mPt)           |                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
|                                                                                         | 1 m <sup>2</sup> de superficie | 1 km de vía de 10 m de ancho | 1 m <sup>2</sup> de superficie | 1 km de vía de 10 m de ancho |
| 13cm interm. + 5cm convenc. (A1+A2+A3+A4+A5+B3)                                         | 2,81                           | 28.087,21                    | 2,50E-01                       | 2.495,54                     |
| 5cm interm. + 5cm RAR-X. (A1+A2+A3+A4+A5+B3)                                            | 1,42                           | 14.209,94                    | 1,25E-01                       | 1.247,65                     |
| Reducción de la puntuación única en la opción con RARx, frente a la opción convencional |                                | 13.877,27                    |                                | 1.247,89                     |

Fuente: Rescatado de Cirtec - <https://cirtec.es/wp-content/uploads/2017/04/ACV-COMPARATIVA-MEZCLAS-ASFALTICAS-DE-REHABILITACION.pdf>

Este estudio se realizó analizando las muestras en 1 m<sup>2</sup> de pavimento con los espesores planteados para ver sus efectos, obteniendo valores para un tramo de 1km. de carretera con 10m de ancho, para la Puntuación y para la categoría de impacto ambiental:

Por lo tanto, se puede concluir viendo los resultados que al utilizar la mezcla con RARx para un tramo de vía de 1 km. de longitud y 10m de ancho, se logra disminuir el impacto ambiental total en 13.877,27 de Material Particulado Total (mPt) y también ayuda a disminuir el cambio climático en 1247,89 mPt, es decir, con la huella ambiental que implica construir 1km. de vía de 10m. de ancho con una mezcla de asfalto convencional, se pueden construir casi 2km. de la misma vía utilizando la mezcla RARx.

En conclusión, se logra dimensionar el ahorro ambiental que produce trabajar con este nuevo material asfáltico RARx el cual ha puesto de manifiesto un ahorro en un 44% en la huella ambiental del proyecto, lo que se une a un ahorro en recursos naturales enorme debido al gran volumen de la obra (CIRTEC: Estudio de análisis de ciclo de vida comparativo de rehabilitación entre mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con aditivo RARx., 2020), además de mencionar que se utilizaron 200.000mil neumáticos para su ejecución. (Jose Manuel López-Cózar, 2020)

### **3.0 Comparación de ambos tipos de pavimentos en función de sus ventajas y desventajas para las dimensiones ambientales.**

Como ya sabemos, tanto los pavimentos flexibles tradicionales como los pavimentos modificados en base a reciclaje de neumático cuentan con la misma estructura para soportar las cargas producidas por los vehículos que transitan sobre ella, por lo mismo, analizando sus capacidades estructurales en conjunto con el impacto ambiental que provoca al construir un pavimento, se observaron las ventajas y desventajas de cada sistema constructivo de pavimentación y poder concluir cual es la mejor opción de pavimentación que aporta al más al medio ambiente.

### **3.1 Sistemas de Pavimentación Tradicional SPT**

Al diseñar mezclas asfálticas tanto los agregados pétreos como la mezcla final deben cumplir con aspectos importantes para lograr obtener la capacidad estructural deseada para que esta sea puesta en servicio y los automóviles puedan transitar sobre ella.

Los agregados pétreos, elemento constituyente de la mezcla asfáltica, debe ser granulométricamente adecuado para la mezcla, es decir, el tamaño de este debe cumplir con lo que se especifica en el proyecto, también contener resistencia al desgaste, tener solidez, ser limpio y puro y tener la capacidad de adherirse al betún asfáltico según las características vistas anteriormente (MINVU, 2018)

Estas, del agregado pétreo varían en conjunto con el betún a utilizar según la localización en que se encuentre el proyecto ya que, el clima es un ente importante a tener en cuenta ya que la mezcla de asfalto no puede colocarse a cierta  $T^{\circ}$  que solicite el proyecto, sino no se llegara a obtener las resistencias adecuadas.

Es por esto que, una vez obtenida la mezcla solicitada esta deberá contar con parámetros de medición que permitirán saber si esta optima a utilizarse, estas son:

- Estabilidad
- Durabilidad
- Impermeabilidad
- Trabajabilidad
- Flexibilidad
- Resistencia a la fatiga
- Resistencia al deslizamiento.

Estas características hacen que el pavimento flexible sea una opción concreta de pavimentación ya que cuenta con las cualidades necesarias para poder resistir constantes cargas de vehículos (MINVU, 2018).

En el ámbito del medio ambiente, para ejecutar un pavimento asfáltico se necesitan de diferentes partidas para su construcción, estas emiten distintos grados de  $CO_2$  hacia la atmosfera en donde, un estudio realizado en Ecuador sobre el análisis de la huella de carbono en vías de pavimento flexible midió la cantidad de  $CO_2$  que generaban estas partidas para poder obtener resultados sobre la contaminación que genera realizar un pavimento asfáltico hacia el medio ambiente. Esto quiere decir que el pavimento asfáltico tradicional realiza constantes emisiones de  $CO_2$  en su ejecución y durante su vida útil, lo que provoca un gran impacto al medio ambiente.(Beltrán et al., 2021)

Es por esto que, observando las cantidades de emisiones de  $CO_2$  de los pavimentos flexibles y en conjunto con la presentación del Dr. Andrés Sotil de la Universidad Continental del Perú que habla sobre los tipos de pavimentos y sus características estructurales (Dr. Ing. Sotil Chávez & Universidad Continental, 2014) y también de la investigación de Ricardo Miranda

de la universidad Austral de Chile, que habla sobre los deterioros de los pavimentos flexibles (Ricardo Javier Miranda Rebolledo, 2010) se pueden concluir las ventajas y desventajas de este tipo de pavimento, en donde estas son:

### ***3.1.1 Ventajas Técnicas de los SPT:***

- Vida estimada de Servicio entre 10 a 15 años
- Reparación rápida y eficiente.
- Se pueden añadir capas de asfalto sobre la carpeta de rodado en cualquier momento.
- Produce bajos niveles de ruido.

### ***3.1.2 Desventajas Técnicas de los SPT:***

- Para cumplir con su vida útil, se debe realizar mantenciones constantes
- Las cargas de los vehículos provocan fisuras, ahuellamientos y deformaciones en el asfalto, en donde, si llegara a existir presencia de agua en estas zonas, pueden causar deslizamientos y finalmente la pérdida de control del vehículo.
- Las fisuras, ahuellamientos, deformaciones por temperatura o fatiga y la meteorización del asfalto, implican un tratamiento frecuente, es decir, realizar tratamientos de sello de grietas y recubrimientos superficiales.
- Las distancias de frenado en el asfalto son altas y aún más cuando este está húmedo y con ahuellamiento.
- Una vez que se hayan formado ahuellamientos en el pavimento asfáltico, se debe realizar una reparación completa ya que, si se le coloca una capa de asfalto sobre ella no evitará que vuelvan aparecer.
- La capa de rodadura pierde su textura rápido y especialmente cuando se encuentra en un estado de humedad.

### ***3.1.3 Ventajas Medio Ambientales de los SPT:***

- No cuenta con ventajas hacia el medio ambiente ya que emite altos niveles de contaminación de CO<sub>2</sub> que provocan un alto impacto, ya sea en el ámbito de la construcción o posteriormente en las constantes mantenciones.

### ***3.1.4 Desventajas Medio Ambientales de los SPT:***

- La gran contaminación ambiental en base a CO<sub>2</sub> hacia el medio ambiente provocado por las diferentes partidas que se realizan al construir un pavimento además de la toxicidad humana, material particulado y el agotamiento fósil en la producción del asfalto.

## ***3.2 Sistemas de Pavimentación Reciclado SPR***

En el caso de los Pavimentos Asfálticos Modificados con polvo de caucho, estos cuentan con la misma estructura de pavimento con respecto al tradicional, es decir, subrasante, subbase, base estabilizada y carpeta asfáltica, en donde la integración de este nuevo elemento según

estudios de la Empresa Cirtec creadora de este nuevo ligante llamado RARx lograron mejorar las características de los pavimentos flexibles logrando principalmente aumentando su vida útil y disminuir las mantenciones constantes que se realizan normalmente en los pavimentos flexibles sin la presencia de este elemento en su mezcla, en donde estas son (CIRTEC - Ensayos y documentación técnica mezcla de caucho (RARx y BMAVC-1), 2022):

- Capacidad Estructural.
- Reducción de ruido (contaminación acústica).
- Macro textura.
- Regularidad Superficial Longitudinal (IRI).
- Regularidad Transversal (Deformaciones y ahuellamientos).
- Fisuración y Deterioros Superficiales.

En el ámbito medioambiental, la empresa Cirtec innovo en pro al medio ambiente y la economía circular creando un ligante asfáltico que incorpora el polvo de caucho, es decir, este elemento proveniente de un neumático fuera de uso luego de que este pasara por el proceso de trituración para luego incorporarlo al ligante y posteriormente a la mezcla final del asfalto.

Es por esto que se realizó un estudio de ciclo de vida comparativo de rehabilitación de firmes de hormigón entre mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con aditivo RARx ubicado en México en donde, se realizó una valorización de la huella ambiental con respecto a las opciones de rehabilitación de la autopista y evidenciar las ventajas que ofrece la mezcla RARx al medio ambiente (CIRTEC: Estudio de análisis de ciclo de vida comparativo de rehabilitación entre mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con aditivo RARx., 2020).

### **3.2.1 Ventajas Técnicas de los SPR:**

- Las mezclas hechas por Cirtec en base a polvo de neumático presentan mayor durabilidad y una elevada resistencia a la fatiga y fisuración con respecto a la mezcla asfáltica tradicional.
- Emite un menor nivel de ruido acústico el cual puede llegar a 5dB o más en comparación con las mezclas asfálticas,
- Con el polvo de neumático se le entrega una macro textura al pavimento el cual provoca una mayor resistencia al deslizamiento hacia el auto con respecto al pavimento asfáltico.
- Las muestras con polvo de neumático presentaron una alta resistencia a la fisuración y otros deterioros en la capa de rodadura en un rango de 12 años.
- Se obtiene una enorme resistencia a la deformaciones plásticas ya que la integración de polvo de neumático a la mezcla le da una elevada viscosidad el cual hace que el pavimento sea más firme.

- Las mezclas fabricadas con polvo de neumático forman una verdadera capa protectora de fisuras en donde es muy poco probable que aparezcan fisuras por fatiga ya que la flexibilidad de esta le confiere una larga vida útil en comparación a la mezcla de asfalto convencional.
- Aporta un mayor confort al usuario.

### ***3.2.2 Desventajas Técnicas de los SPR:***

- Para cumplir con su vida útil se deben realizar mantenciones, pero estas se realizan en un mayor periodo de tiempo con respecto al asfalto convencional.

### ***3.2.3 Ventajas Medio Ambientales de los SPR:***

- Permite la reutilización de los neumáticos fuera de uso, teniendo un consumo de 4 neumáticos por ton. de mezcla asfáltica. Mejora sustancial del Análisis de Ciclo de Vida del estudio de rehabilitación de la autopista en México protegiendo al medio ambiente disminuyendo la huella ambiental (CO<sub>2</sub>), en donde se utilizaron 200.000 mil neumáticos.
- Permite la optimización de firmes y, por tanto, un menor uso de los recursos naturales.
- Disminución de contaminación acústica
- Al poder ser de un espesor menor la capa de rodadura asfáltica, esta produce un menor grado de contaminación de CO<sub>2</sub> gracias al menor trabajo a realizar además de no contener la misma cantidad de áridos pétreos en comparación los asfaltos convencionales, el cual posibilita construir más m<sup>2</sup> de pavimento.

### ***3.2.4 Desventajas Medio Ambientales de los SPR:***

- Realiza de igual manera una contaminación ambiental gracias a sus diferentes partidas, personas y procesos además de las mantenciones posteriores, pero logrando una disminución considerable en comparación al asfalto convencional sobre el impacto que produce hacia el medio ambiente sobre la huella ambiental que se produce al ejecutar este tipo de obras ya que su vida útil aumenta.

Por ende, podemos evidenciar y concluir que el nuevo ligante modificado con polvo de neumático le aumenta y otorga mayores capacidades estructurales, mejores cualidades en puesta y servicio y en trabajabilidad a la mezcla asfáltica además de aportar con una gran disminución en la huella de carbono hacia el medio ambiente, en donde según el estudio de ciclo de vida de Cirtec se comprobó que 1 km. de asfalto convencional contamina lo mismo que 2km. de asfalto modificado con polvo de caucho.

## 4.0 Conclusiones sobre el análisis comparativo entre los SPT y los SPR

Tabla 10: Análisis Comparativo entre los SPT y los SPR (Dimensión Técnica)

| Análisis Comparativo entre los SPT y los SPR    |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Características Técnicas                        | SPT                                                                                                                   | SPR                                                                                                                                                                                        |
| Vida Estimada                                   | Entre 10 a 15 años con mantenciones constantes cada 5 a 10 años según el estado del pavimento                         | La mezcla RARx producen un aumento en su vida útil con respecto a los SPT, pero de igual manera se deben realizar mantenciones pero en un mayor periodo de tiempo.                         |
| Estabilidad                                     | Es estable ya que logra distribuir las cargas de manera eficiente pero necesita de mantenciones constantes.           | Logra una mayor estabilidad ya que al tener mayor proyección de vida útil este necesita de menores mantenciones.                                                                           |
| Durabilidad                                     | Esta varía por el estado del pavimento en donde, su durabilidad puede ser muy baja en algunos casos.                  | Presenta mayor durabilidad ya que con el polvo de neumático disminuyen las fisuras y deformaciones                                                                                         |
| Impermeabilidad                                 | El pavimento se deforma a través de constantes cargas; alto nivel de permeabilidad el cual provoca fallas.            | Al ser más resistentes a las fisuras y deformaciones, el pavimento modificado tiene mayor impermeabilidad.                                                                                 |
| Trabajabilidad                                  | Tiene una buena trabajabilidad ya que su puesta en servicio es rápida y eficiente.                                    | Al igual que el SPT, este método de pavimentación tiene una buena trabajabilidad ya que su puesta en servicio es rápida y eficiente.                                                       |
| Flexibilidad                                    | Buena flexibilidad pero bajo nivel de reparación a su forma inicial provocando deformaciones.                         | Según el ensayo de torsión hecho por Cirtec, los SPR tienen muy buena flexibilidad además de obtener una mayor recuperación a su forma inicial el cual aporta a la disminución de fisuras. |
| Regularidad Superficial (IRI)                   | Al ser un pavimento que se deforma constantemente este produce fisuras el cual, provoca una superficie irregular.     | Al contener caucho la mezcla asfáltica, este le entrega una alta resistencia a las fisuras y deformaciones, en consecuencia, provoca que la regularidad del pavimento perdure más tiempo.  |
| Capacidad Estructural (Resistencia a la fatiga) | Buena resistencia a la fatiga pero se le deben realizar constantes mantenciones, de lo contrario, presentará fisuras. | Debido a su alto contenido de ligante asfáltico (9-10%), este le otorga a la mezcla una alta capacidad estructural para no sufrir fisuras ni deformaciones.                                |
| Macro Textura (Resistencia al deslizamiento)    | Tiene buena resistencia al deslizamiento pero si el pavimento está húmedo pierde notorias capacidades de adherencia.  | Al ser una mezcla consistente, la postcompactación entrega por el tráfico afecta de manera mínima al pavimento logrando que su regularidad perdure siendo más adherente.                   |
| Contaminación Acústica                          | El pavimento produce bajos niveles de ruido.                                                                          | Logra un efecto favorable logrando disminuir entre 3-5 dB con respecto al SPT.                                                                                                             |

Fuente: Elaboración propia con respecto a todos los datos técnicos obtenidos.

En el ámbito de técnico de cada uno de los sistemas de pavimentación comparados, queda demostrado que el polvo de neumático integrado en la mezcla asfáltica le otorga múltiples mejoras al pavimento asfáltico tradicional el cual, permite que estos pavimentos logren tener una vida útil más prolongada y también permite que su mantención no sea tan constante sino más periódica permitiéndole además reducir costos de mantención y por otro lado, utilizar

un elemento innovador como es el neumático fuera de uso que a nivel mundial existen grandes cantidades de desechos de este material.

*Tabla: Análisis Comparativo entre los SPT y los SPR (Dimensión ambiental)*

| Características Ambientales | SPT                                                                                                                                                                                                                                         | SPR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Material Particulado</b> | Alto nivel de polución provocado por los trabajos en obra durante el proceso de ejecución y mantención del pavimento.                                                                                                                       | Para ejecutar un pavimento independiente el tipo que sea (SPT-SPR) se deben realizar las mismas actividades y utilizar la misma cantidad de maquinarias y personas, el cual, cada uno de ellos son entes emisores de CO <sub>2</sub> , pero el SPR, al utilizar polvo de caucho en su mezcla, significa que la cantidad de CO <sub>2</sub> producida por labricación de agregados petreos disminuya. Esto queda demostrado en el ACV hecho por Cirtec que el SPR puede ejecutar el doble de trabajo con respecto a las emisiones de CO <sub>2</sub> que los SPT, logrando así, una disminución importante de gases hacia el medio ambiente ademas de estar utilizando un material reciclado proveniente de un NFU aportando la disminución de este en el planeta. |
| <b>Toxicidad Humana</b>     | Altos niveles de emision de CO <sub>2</sub> por parte del ser humano teniendo en cuenta que se realizan mantenciones continuas.                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Agotamiento Fossil</b>   | Alto nivel emisión de CO <sub>2</sub> al producir el agregado pétreo siendo este el elemento principal de la mezcla                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Cambio Climático</b>     | Al existir grandes cantidades de emisiones de CO <sub>2</sub> por diferentes ambitos dentro de la ejecución de un pavimento asfáltico, este se vuelve un ente altamente contaminante el cual provoca un grave impacto en el medio ambiente. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

*Fuente: Elaboración propia con respecto a todos los datos medioambientales obtenidos.*

En conclusión, con respecto a la dimensión ambiental, los pavimentos son altamente contaminadores de CO<sub>2</sub> al medio ambiente.

Existen 3 principales entes que producen una alta contaminación hacia el medio ambiente y que a su vez son primordiales a la hora de ejecutar obras de pavimentación ya sean tradicionales o reciclados.

En primer lugar, el material particulado se produce gracias a los movimientos de tierra ya sean excavaciones o rellenos de material para las distintas capas que componen el paquete estructural, estas son subrasante, subbase y base estabilizada, en donde se le suman las maquinarias el cual al moverse también producen polución hacia el medio ambiente.

Por otro lado, está la Toxicidad humana, es decir, todo el personal que está destinado a ejecutar la obra, es decir, desde el ayudante o maestro hasta el administrador de obra; cada uno de ellos al respirar emite cierta cantidad de CO<sub>2</sub> que, si se analiza a gran escala, la suma de cada emisión por persona termina siendo un gran ente contaminador de CO<sub>2</sub> al medio ambiente.

Y finalmente, está el agotamiento fósil que se utiliza para conseguir el material pétreo utilizado en ambas mezclas asfálticas, siendo reducido en los SPR con respecto a los SPT,

pero, aun así, provocando altos niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> hacia el medio ambiente al fabricar este elemento constituyente de la mezcla asfáltica.

Estos 3 entes contaminadores están presentes en ambos tipos de sistemas de pavimentación y están involucrados directamente con el cambio climático que se presenta a nivel global y como pudimos observar en los estudios de emisiones de CO<sub>2</sub> por parte de los pavimentos asfálticos hecho en Ecuador y el estudio de ACV por parte de Cirtec comparando las emisiones de gases entre una mezcla convencional y otra modificada, se demostró que la mezcla bituminosa que integra polvo de neumático en su mezcla, produce un menor grado de contaminación ambiental al cambio climático en comparación a las mezclas bituminosas tradicionales, logrando poder construir un tramo de 2km. de pavimento en comparación a solo 1km pavimento construido produciendo la misma cantidad de CO<sub>2</sub> al medio ambiente.

Por lo que, integrar este nuevo elemento a la construcción de pavimentos o reparaciones lo hace viable por medio de la dimensión ambiental logrando disminuir la contaminación de CO<sub>2</sub> y también la cantidad de NFU existente en el país aportando de gran manera al reducir el cambio climático que afecta al ser humano, flora y fauna del país y planeta.

## ***Bibliografía***

AMORIM, E. F. (2018). Uso de residuos de caucho en pavimentos de asfalto: una revisión de

- literatura. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento*, 2(7), 39–47.  
<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/ingenieria-civil/pavimentacao-asfaltica-3>
- Beltrán, P., García, K., & Carlos Cordero. (2021). *Análisis de la huella de carbono en vías de pavimento flexible (asfalto): Vías de segundo orden en la provincia del Azuay, Ecuador*.  
file:///C:/Users/esteb/Downloads/1927-Texto del artículo-8840-1-10-20211104 (1).pdf
- Camara de la Industria del Neumático de Chile A.G. (CINC). (2020, July 27). *GENERACION DE NEUMATICOS FUERA DE USO*. <https://cinc.cl/wp-content/uploads/2020/07/200727-Estadísticas-NFU.pdf>
- Carolina Gonzales, & Emol. (2022, March 20). *Presencialidad y parque automotriz: Regiones registran aumento de tacos y ciudades serían 15 minutos más lentas* | *Emol.com*.  
<https://www.emol.com/noticias/Nacional/2022/03/20/1055410/tacos-regiones-presencialidad-parque-automotriz.html>
- Cesar Flores Córdova. (2015). *Egresado analiza método alternativo para predecir CBR en diseño de pavimentos - UDEP Hoy*. <https://www.udep.edu.pe/hoy/2015/01/metodo-alternativo-cbr/>
- CIRTEC: Estudio de análisis de ciclo de vida comparativo de rehabilitación entre mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con aditivo RARx. (2020). *ESTUDIO DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE REHABILITACIÓN DE FIRMES DE HORMIGÓN ENTRE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONVENCIONALES Y MEZCLA ASFÁLTICA CON ADITIVO RAR-X PROYECTO AUTOPISTA DE PIRÁMIDES A TULANCINGO (MÉXICO) Conforme a ISO 14021 y UNE-EN 15804*.
- Cirtec: Obras Ejecutadas mediante RARx y betunes modificados. (2022). *Obras ejecutadas con Betunes Modificados con caucho* | *CIRTEC*. <https://cirtec.es/obras-ejecutadas/>
- Cirtec. (2020, July 15). *Primera obra con RARx en Chile* | *Cirtec*. <https://cirtec.es/blog/primera-obra-con-rarx-en-chile/>
- Cirtec - Autodeclaración ambiental aditivo RARX®. (2020). *AUTODECLARACIÓN AMBIENTAL DE PRODUCTO DEL ADITIVO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS RARX® DE CIRTEC Conforme a ISO 14021 y UNE-EN 15804*. <https://cirtec.es/>
- CIRTEC - Betunes Caucho RARx. (2022). *Betunes modificados con Caucho* | *Cirtec*.  
<https://cirtec.es/betunes-mejorados-con-polvo-de-neumatico/>
- CIRTEC - Ensayos y documentación técnica mezcla de caucho (RARx y BMAVC-1). (2022). *ENSAYOS Y DOCUMENTACIÓN TÉCNICA MEZCLAS CON CAUCHO • PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS CON RAR-X Y BMAVC-I. TABLAS Y GRÁFICOS. • FICHA TÉCNICA RARX • OTROS ASPECTOS IMPORTANTES*.
- Dr. Ing. Sotil Chávez, A., & Universidad Continental. (2014, September 12). *TIPOS DE PAVIMENTOS*. [https://es.slideshare.net/kevinromerolatorre/tipos-de-pavimentos?next\\_slideshow=39035463](https://es.slideshare.net/kevinromerolatorre/tipos-de-pavimentos?next_slideshow=39035463)
- Escuela Europea de Excelencia ISO 14001:2015. (2016, July 13). *ISO 14001 2015: Los aspectos ambientales*. <https://www.nueva-iso-14001.com/2016/07/iso-14001-2015-los-aspectos-ambientales/>
- Felipe Osorio, Javier Faúndez, & Escuela de Construcción Civil- Pontificia Universidad Católica. (2021, January 26). *Vertederos ilegales y microbasurales en Chile ocupan superficie equivalente al 101% de la comuna de Providencia - Instituto de la Construcción*.  
<https://www.iconstruccion.cl/2021/01/26/vertederos-ilegales-y-microbasurales-en-chile-ocupan-superficie-equivalente-al-101-de-la-comuna-de-providencia/>
- Francisco Tampier Palacios, & Universidad Mayor. (2015). *FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN ESCUELA DE CONSTRUCCIÓN CIVIL*.
- Gerardo Botasso, U. de P.-C. tv. (2018). *Utilización de caucho reciclado de neumático fuera de uso en mezclas asfálticas*. - YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=oWLC6WuAM->

k&t=225s

- GOB. Regional de Arica y Parinacota. (2018, October 19). *Ley REP. Nueva Ley Para Combatir 140 Mil Toneladas de Neumáticos En Desuso*. <https://goreayp.cl/index.php/noticias/1962-nueva-ley-para-combatir-140-mil-toneladas-de-neumatico>
- Home. (2018). *Polambiente, pioneros en el reciclaje de neumáticos – Home*. <https://cambiaelswitchcom.wordpress.com/2018/12/04/polambiente/>
- Hwd, D. (2020). *DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO*. Ingeniería y Construcción. (2020, April 2). *Tipos de pavimento. — Ingeniería y Construcción Colombia*. <https://www.ingenieriayconstruccioncolombia.com/tipos-de-pavimento/>
- Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería ISCI. (2021, March 17). *Parque de autos se acelera y rozará los 5,5 millones de unidades este año — ISCI : ISCI*. <https://isci.cl/parque-de-autos-se-acelera-y-rozara-los-55-millones-de-unidades-este-ano/>
- Jose Manuel López-Cózar. (2020, January 9). *Sacyr utiliza 200.000 neumáticos reciclados para hacer una carretera en México - Signus Blog*. <https://blog.signus.es/sacyr-utiliza-200-000-neumaticos-reciclados-para-hacer-una-carretera-en-mexico/>
- Ministerio de Obras Publicas- Dirección de Viabilidad. (2021). *RED VIAL NACIONAL Dimensionamiento y carasteristicas*. <https://vialidad.mop.gob.cl/areasdevialidad/gestionvial/Documents/RedVialNacionalDimensionamientoyCaracteristicas2020.pdf>
- Ministerio de obras Publicas. (2019). *Red Vial Nacional: Dimensionamiento y características*. <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/gestionvial/Documents/RedVialNacional2019.pdf>
- Ministerio de Obras Públicas - Dirección de Vialidad. (2020). *Ministerio de Obras Públicas - Dirección de Vialidad*. <https://vialidad.mop.gob.cl/areasdevialidad/medioambiente/Paginas/MedioAmbiente.aspx>
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia, B. (1994, March 9). *Ley-19300 09-MAR-1994 MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA - Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- MINVU. (2018). *Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentacion*. [https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/normas\\_pavimentacion.pdf](https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/normas_pavimentacion.pdf)
- Municipalidad de Padre Hurtado, & Unidad de Proyectos - SECPLA. (2022, January 6). *Red Vial BNUP - Padre Hurtado. Detalles Sobre Las Vías de La Comuna de Padre Hurtado (Longitudes) .* <https://mail.google.com/mail/u/0/?tab=rm&ogbl#inbox/FMfcgzGmtNbPmlVJmQtFQbRLqNxhXDWV?projector=1&messagePartId=0.2>
- Nicolas Godoy Aranda, U. M. (2019, June). *Sustentabilidad en Obras Viales*. [http://repositorio.umayor.cl/xmlui/bitstream/handle/sibum/7648/18501498-3\\_SAG.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.umayor.cl/xmlui/bitstream/handle/sibum/7648/18501498-3_SAG.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- País Circular. (2019, April 1). *Ley REP: Decreto final de neumáticos fija metas de recolección regionales desde 2023 - País Circular*. <https://www.paiscircular.cl/industria/ley-rep-decreto-final-de-neumaticos-fija-metas-de-recoleccion-regionales-desde-2023/>
- Polambiente: ¿Por qué reciclar? (2022). *Polambiente – Reciclaje de neumáticos*. <https://www.polambiente.cl/>
- Polambiente. (2020). *POLAMBIENTE I NOSOTROS*. <https://www.polambiente.com/nosotros>
- Polambiente. (2022). *Polambiente – Reciclaje de neumáticos*. <https://www.polambiente.cl/>
- Reporte del Estado del Medio Ambiente - M.M.A. (2022, January 18). *Reporte del Estado del Medio Ambiente 2021 da cuenta del desempeño ambiental de Chile – MMA*. <https://mma.gob.cl/reporte-del-estado-del-medio-ambiente-2021-da-cuenta-del-desempeno-ambiental-de-chile/>

- Revista Minera Crisol. (2021, February 23). *EN CHILE SE DESECHAN 6,6 MILLONES DE NEUMÁTICOS EQUIVALENTE A CERCA DE 180 MIL TONELADAS* | *Revista Minera Crisol*. <https://revistacrisol.cl/en-chile-se-desechan-66-millones-de-neumaticos-equivalente-a-cerca-de-180-mil-toneladas/>
- Ricardo Javier Miranda Rebolledo. (2010). *Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos*.
- SERVUIM. (2018). *CAP II.A: ESPECIFICACIONES TECNICAS DE PAVIMENTOS EN ASFALTO*. <http://pavimentacion.serviurm.cl/doc/MPALL/CAP2A.pdf>
- Superintendencia del Medio Ambiente Gob. de Chile SMA. (2020, June 18). *Realizan un fuerte llamado a no usar calefactores a leña en el Gran Santiago para evitar aumento de Covid 19 y contaminación del aire* | *Superintendencia Del Medio Ambiente*. <https://portal.sma.gob.cl/index.php/2020/06/18/realizan-un-fuerte-llamado-a-no-usar-calefactores-a-lena-en-el-gran-santiago-para-evitar-aumento-de-covid-19-y-contaminacion-del-aire/>

SOLO USO ACADÉMICO

## **ANEXOS**

### **1.- Obras Realizadas con el aditivo RARx y betunes modificados por la empresa Cirtec:**

En España, hace 20 años que se viene implementando el uso de caucho en la construcción de pavimentos en donde a la fecha, ya cuentan con más de 1600km de vía.(Cirtec: Obras Ejecutadas mediante RARx y betunes medificados., 2022)

Algunos países en donde se han realizado trabajos son: México, Alemania, Estados Unidos, Irlanda, Emiratos Árabes Unidos.

- <https://cirtec.es/obras-ejecutadas/>

### **2.- Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación - MINVU**

En Chile para la construcción de pavimentos, ya sea de asfalto u hormigón, se utilizan el Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación hecho por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo el cual, estipula el diseño y ejecución de las distintas capas estructurales del pavimento, las cuales son: subrasante, subbase y base estabilizada.

Además, se presentan los diseños de pavimentos de hormigón y asfalto y mezclas asfálticas, en conjunto con sus especificaciones técnicas según corresponda la ubicación del proyecto ya que, para el diseño de pavimentos influyen aspectos como el clima, tipo de suelo y tipo de proyecto (Pasajes, Calles locales, Calles de Servicio).

Es decir, integra todas las partes que se den tener en cuenta para el diseño y construcción de los distintos tipos de pavimentos.

- [https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/normas\\_pavimentacion.pdf](https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/normas_pavimentacion.pdf)