



**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA
DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SUSTENTABLES**

CARRERA: INGENIERÍA CIVIL

ALUMNO:

MARÍA JULIETA REANO (R – 4100/9)

DIRECTORES: MARINA CAUHAPÉ CASAUX

MARGARITA PORTAPILA

ASESORES: SILVIA ANGELONE

JUAN PABLO RAFFAELLI

TITULAR DE CÁTEDRA: ING. RUBÉN LOPEZ

DICIEMBRE 2022

PROYECTO IV 2022

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. OBJETIVO.....	9
3. ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....	10
3.1. Análisis estructural de pavimentos flexibles.....	10
3.2. Análisis del ciclo de vida.....	13
4. SELECCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS A ESTUDIAR.....	15
4.1. Mezclas asfálticas con adición de plásticos reciclados.....	16
4.2. Mezclas asfálticas con adición de caucho.....	17
4.3. Mezclas asfálticas templadas.....	17
4.4. Mezclas asfálticas de control.....	18
4.1.1. Mezcla asfáltica convencional de tipo densa.....	18
4.1.2. Mezcla asfáltica con asfalto modificado.....	18
4.1.3. Mezcla asfáltica de alto módulo.....	18
4.5. Curvas Maestras de Módulo Dinámico de las mezclas seleccionadas.....	19
4.6. Leyes de falla por Fatiga.....	22
4.7. Leyes de falla por Ahuellamiento.....	26
5. DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	30
5.1. Determinación de las solicitaciones.....	31
5.1.1. Cálculo de solicitaciones de tránsito: ESALs.....	31
5.1.1.1. Elección de parámetros y recopilación de información para estimación de ESALs.....	31
5.1.1.2. Clasificación vehicular y factores de camión.....	33
5.1.1.3. Crecimiento anual del tránsito.....	34
5.1.1.4. Cálculo ESALs.....	35
5.1.2. Solicitaciones asociadas a las condiciones climáticas.....	35
5.2. Diseño de paquetes estructurales de pavimentos flexibles.....	36
5.2.1. Metodología de diseño.....	36
5.2.2. Dimensionamiento de las estructuras analizadas.....	39

6. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	42
6.1. Teoría del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	42
6.2. Marco de referencia para ACV: parámetros, hipótesis y consideraciones.....	49
6.3. Selección de software de cálculo ACV.....	54
6.3.1. OpenLCA.....	55
6.3.2. PaLATE.....	59
6.3.3. LCA Pave.....	62
6.4. Determinación ACV para las distintas mezclas.....	66
7. ESTUDIO DE COSTOS.....	75
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	80
9. CONCLUSIONES.....	82
10. BIBLIOGRAFÍA.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de carta de diseño Shell ‘78.....	11
Figura 2 – Tensiones horizontales y verticales que conducen a la falla por fatiga o por ahuellamiento, respectivamente. Fuente: elaboración propia.....	11
Figura 3 – Izq a Der: PE Micronizado (M), Pellets de Bidones (B), Pellets de Silobolsas (SB).....	17
Figura 4 – Esquema de carga (izquierda) y respuesta del material (derecha). Fuente: elaboración propia.....	20
Figura 5 - Esquema de curva maestra de modulo dinámico.....	21
Figura 6 - Curvas maestras de las mezclas asfálticas.....	22
Figura 7 - Ensayo de viga a flexión en 4 puntos []......	23
Figura 8 - Comparación de curvas maestras entre mezclas con plástico propias y de bibliografía [24].	24
Figura 9 - Comparación de curvas maestras entre mezclas con caucho propias y de bibliografía [24]	25
Figura 10 – Leyes de falla por fatiga de las mezclas extraídas de la bibliografía.....	26
Figura 11 - Ensayo de Rueda de Carga.....	27
Figura 12 – Esquema de curva resultante de WTT.....	28
Figura 13 – Profundidad de huella.....	29
Figura 14 – Leyes de falla por ahuellamiento (resultados WTT).....	29

Figura 15 – Evolución del TMDA en el tiempo.....	32
Figura 16 – Proyección TMDA en el periodo de diseño.....	35
Figura 17 - Leyes de falla por fatiga (calibradas).....	39
Figura 18 - Esquema estructural	39
Figura 19 - Esquema estructural patrón	40
Figura 20 - Espesores de bases asfálticas con materiales diversos.....	41
Figura 21 - Ciclo de vida de un producto o servicio. Fuente: elaboración propia.....	42
Figura 22 – Descripción de entradas y salidas de un proceso. Fuente: University of California Pavement Research Center []	43
Figura 23 - Esquema proceso ACV. Fuente: elaboración propia.....	44
Figura 24 - Límites del Sistema. Fuente: elaboración propia.....	45
Figura 25 – Esquema de las etapas de un ACV según norma ISO 14040.....	46
Figura 26 - Esquemización de LCI y LCIA. Fuente: elaboración propia.....	47
Figura 27 – Ejemplo de modelo de caracterización. Fuente: Cabaraban et Al [].	48
Figura 28 – Etapas del ciclo de vida de un pavimento consideradas por distintos autores. Fuente: Sánchez Navarro [44].....	51
Figura 29 – Categorías de impacto consideradas por distintos autores. Fuente: Sánchez Navarro [44]	51
Figura 30 – Límites del Sistema para el presente ACV. Fuente: Elaboración Propia.....	54
Figura 31 - Logo del Software OpenLCA []	56
Figura 32 – Base de datos (Captura de pantalla OpenLCA).....	57
Figura 33 – Límites del sistema de producto y procesos unitarios (Captura de pantalla OpenLCA). ..	57
Figura 34 - Captura de pantalla OpenLCA.....	58
Figura 35 - Captura de pantalla OpenLCA.....	58
Figura 36 – Consideración de materiales reciclados de OpenLCA	59
Figura 37 - Logo del Software PaLATE []	59
Figura 38 - Hoja "Des" PaLATE (extracto de captura de pantalla).....	60
Figura 39 - Hoja "Init Const" PaLATE (extracto de captura de pantalla)	60
Figura 40 - Hoja "Eqmt" PaLATE (extracto de captura de pantalla).....	60
Figura 41 - Hoja "Env Results" PaLATE (extracto de captura de pantalla)	61
Figura 42 - Hoja "EMF" PaLATE (extracto de captura de pantalla).....	61
Figura 43 - Logo LCA Pave [30].	62
Figura 44 – Pantalla inicial de LCA Pave.....	63
Figura 45 – Biblioteca (Captura de Pantalla de LCA Pave).	64
Figura 46 – Pantalla de Análisis (Captura de Pantalla de LCA Pave).....	65
Figura 47 – Pantalla de resultados (Captura de Pantalla LCA Pave).....	65

Figura 48 – Captura de pantalla LCA_Pave. Pestaña “Activity” para mezcla con SBVS.....	69
Figura 49 – Resultados de impacto ambiental de las mezclas estudiadas, en términos de calentamiento global.	72
Figura 50 - GWP final (restando las emisiones generadas por la incineración).	73
Figura 51 - GWP etapas de elaboración de materiales y construcción.	74
Figura 52 - GWP generado en las etapas de transporte.....	75
Figura 53 - Resultados de costos	78
Figura 54 - Resultados de costos, excluyendo el transporte.....	79
Figura 55 - Comparación en términos económicos y ambientales, en % respecto a la mezcla convencional.	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Reducción de emisiones por producción de mezclas templadas respecto a CAC [14]	15
Tabla 2 - Propiedades de las mezclas asfálticas a estudiar.....	19
Tabla 3 - Resultados de ensayos realizados sobre las mezclas asfálticas a estudiar.	19
Tabla 4 - Parámetros de las curvas maestras de las mezclas.	21
Tabla 5 - Comparación de propiedades de mezclas con plástico propias y de bibliografía [24].	24
Tabla 6 - Comparación de propiedades de mezclas con caucho propias y de bibliografía [24].	25
Tabla 7 - Parámetros leyes de falla por fatiga	25
Tabla 8 – Resultados de Wheel Tracking Test	28
Tabla 9 – Normativa vigente sobre resistencia al ahuellamiento.	30
Tabla 10 - TMDA RN 11 km 1007.79 a km 1044.76	32
Tabla 11 - Distribución vehicular	34
Tabla 12 - Parámetros de leyes de falla por fatiga.....	38
Tabla 13 - Resultados del análisis estructural	41
Tabla 14 – Ejemplos de categorías de impacto e indicadores de categoría.....	47
Tabla 15 – Revisión Bibliográfica: ACV realizados por diversos autores (Parte 1).....	49
Tabla 16 - Revisión Bibliográfica: ACV realizados por diversos autores (Parte 2)	50
Tabla 17 – Cantidad de mezcla asfáltica necesaria para realizar 1 km de base asfáltica	66
Tabla 18 - Cantidad de agregados necesarios para realizar 1 km de base asfáltica.....	66
Tabla 19 - Cantidad de ligante asfáltico necesario para realizar 1 km de base asfáltica.....	67
Tabla 20 - Cantidad de materiales reciclados para realizar un 1km de base asfáltica	67
Tabla 21 - Equipos empleados y tiempo de uso en horas para la colocación de 1 km de base asfáltica	68
Tabla 22 - Listado de equipos	69

Tabla 23 - Horas de uso de mezcladora PMB	70
Tabla 24 - Resultados del ACV con etapas de transporte incluidas.....	70
Tabla 25 - Resultados del ACV sin incluir etapas de transporte.	71
Tabla 26 – Emisiones de diferentes disposiciones de los residuos.....	71
Tabla 27 – GWP sustraídas las emisiones asociadas a la incineración.....	72
Tabla 28 - Precios unitarios de materia prima	76
Tabla 29 – Consumo de combustible de los equipos a emplear	76
Tabla 30 - Consumo de combustible asociado al transporte de materiales	77
Tabla 31 - Tabla resumen de materiales empleados en cada mezcla.	77
Tabla 32 - Resultados del análisis de costos.....	77
Tabla 33 - Comparativa de costos respecto a la mezcla convencional.	78
Tabla 34 – Incidencia estimada de los diferentes ítems en el costo total.....	80
Tabla 35 - Ranking de mezclas a igualdad de importancia entre criterios económico y ambiental	81
Tabla 36 - Ranking de mezclas a mayor importancia de criterio ambiental sobre económico.....	81

Resumen

La tendencia actual en todos los ámbitos del desarrollo consiste en prestar cada vez más atención a las implicancias ambientales de las actividades humanas. El desafío asumido en el presente trabajo consiste en aplicar el concepto de sostenibilidad al diseño de pavimentos flexibles. Se busca analizar distintas soluciones estructurales de pavimento flexible y encontrar aquella que resulte óptima desde un punto de vista técnico, económico y ambiental.

Debido a la fuerte inclinación que existe hoy en día a incorporar materiales reciclados en las mezclas y el desarrollo de mezclas elaboradas a menores temperaturas, en el presente estudio se realiza la comparación de una mezcla asfáltica convencional con otras del tipo “sustentables”, que contienen residuos plásticos, neumáticos fuera de uso y mezclas asfálticas templadas. Tales mezclas se incluyen como base asfáltica en paquetes estructurales diseñados por medio de métodos empírico-mecanicistas. Luego, se evalúan las implicancias ambientales de las diferentes bases asfálticas mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ISO 14040 y 14044). Se concluye que las mezclas que más se adaptan a los criterios mencionados son aquellas que presentan las mejores propiedades mecánicas, ya que logran estructuras de menor espesor y reducen el empleo de materiales vírgenes. Reducir la energía empleada en la etapa de elaboración de la mezcla es un factor que resulta positivo, al igual que incorporar residuos de otros procesos. Sin embargo, para que el uso de materiales reciclados tenga un impacto positivo relevante, se debe intentar que los mismos reciban el menor procesamiento posible y sean incorporados en cantidades significativas, sin afectar negativamente las propiedades mecánicas y reológicas de la mezcla. Para cualquier intento de aplicación de residuos en mezclas asfálticas, es necesario estudiar las propiedades de los desechos y asegurar que la integridad física de la estructura del pavimento no se vea comprometida como resultado del reciclaje.

1. INTRODUCCIÓN

La sustentabilidad es un concepto que hace referencia a la posibilidad de realizar una actividad de manera sostenible en el tiempo, es decir, sin dañar el medio ambiente o agotar sus recursos, de manera que los mismos sigan estando disponibles para generaciones futuras. Además, la sustentabilidad se relaciona con el hecho de no generar residuos a una tasa mayor que la tasa natural de degradación del medio ambiente. El desafío consiste en incorporar el concepto sustentabilidad a los diferentes ámbitos de desarrollo económico y social.

En el presente estudio se busca aplicar estos conceptos al diseño de pavimentos flexibles. En la industria del asfalto se generan emisiones que impactan negativamente al medio ambiente

incrementando la huella de carbono, desde la elaboración del cemento asfáltico en las refinerías hasta la colocación de la mezcla asfáltica in situ, pasando por la explotación de canteras para extracción de agregado pétreo, la elaboración del concreto asfáltico a altas temperaturas y el transporte de materiales, entre otros.

En el último tiempo, el análisis del ciclo de vida (ACV) ha cobrado importancia ya que permite evaluar el impacto ambiental de una construcción en términos de emisiones de gases de efecto invernadero u otros indicadores pertinentes y, en base a este análisis, se pueden comparar distintas soluciones ingenieriles en términos de impacto ambiental. Según el enfoque que se dé al ACV, se pueden evaluar los costos ambientales en relación a la producción de materias primas, elaboración de mezclas asfálticas, vida útil en servicio, procesos de mantenimiento y disposición final/valor residual.

Sin embargo, el concepto de sustentabilidad aplicado a pavimentos flexibles no solo se refiere al cuidado ambiental: se debe también garantizar la seguridad y el confort de la circulación, así como la rentabilidad económica. Es por ello que en este trabajo se diseñan y evalúan diferentes estructuras de pavimentos flexibles, estructuralmente equivalentes entre sí, que incluyen mezclas asfálticas consideradas sustentables. Para ello se emplea un método de diseño empírico-mecanicista. Luego, las distintas soluciones técnicamente aptas se someten a una comparación en términos ambientales (ACV) y económicos, de manera de arribar a la mejor solución técnico-económico-ambiental.

Para conseguir una mezcla asfáltica ambientalmente sustentable existen distintos enfoques: por ejemplo, puede considerarse la incorporación de residuos o materiales reciclados dentro de las capas estructurales de pavimento, y así reducir su acumulación en vertederos; disminuirse el gasto energético mediante el empleo de mezclas asfálticas templadas (menor temperatura de producción), lo que conlleva una reducción de emisiones. Asimismo, pueden emplearse mezclas asfálticas de mayor durabilidad o con mejores propiedades mecánicas, que requieran menor mantenimiento, tengan una mayor vida útil y se puedan emplear espesores menores, conduciendo a un menor consumo de materiales y recursos.

De acuerdo con este contexto, las mezclas asfálticas propuestas incluyen mezclas templadas, mezclas con materiales reciclados y mezclas con propiedades mecánicas mejoradas.

Para mezclas con materiales reciclados se considera incluir silo-bolsas, bidones de fitosanitarios y neumáticos fuera de uso (NFU). Su selección se basa en el hecho que en Argentina se generan importantes residuos de Silo-Bolsa y bidones de fitosanitarios, elementos muy utilizados en la agricultura del país, que son susceptibles de ser incorporados a las mezclas asfálticas debido a la potencial compatibilidad físico-química entre el ligante asfáltico y el polietileno del que están constituidos estos plásticos de descarte. Por otro lado, en el país existe un gran auge del transporte de

mercancías mediante camiones, lo que conduce a la generación de cantidades importantes de NFU. Se considera que la adición de caucho proveniente de NFU en las mezclas asfálticas mejora la flexibilidad, la durabilidad, la resistencia al envejecimiento y la susceptibilidad térmica de las mismas. Por lo tanto, la incorporación de caucho contribuye a la mejora de las propiedades de la mezcla y a su vez la mezcla en sí constituye un buen destino para el caucho reciclado proveniente de los NFU.

Las mezclas templadas, por su parte, son mezclas que se elaboran a menores temperaturas que las mezclas asfálticas en caliente y poseen iguales prestaciones mecánicas que éstas. Surgen con el objetivo de reducir el consumo energético y la emisión de sustancias volátiles y humos perjudiciales que se generan en la producción de mezclas asfálticas en caliente. Para generar un ahorro adicional de energía se busca prescindir del secado de los agregados, por lo cual se introducen las emulsiones asfálticas como ligante. Estos tipos de mezclas cuentan con un muy importante grado de desarrollo y en Argentina se presentan especificaciones que regulan su diseño y uso.

Se analizan también mezclas convencionales, mezclas con asfalto modificado con polímeros y mezclas de alto módulo. Las mismas son tomadas como mezclas de control porque son las más empleadas en el país y se tiene conocimiento y experiencia sobre su comportamiento. Las mezclas con asfalto modificado y las de alto módulo, presentan propiedades mecánicas mejoradas y suelen ser ventajosas justamente debido a su alta resistencia y baja necesidad de rehabilitación por lo que resulta interesante compararlas con las mezclas sustentables.

Finalmente, cabe destacar que las obras viales recaen dentro de lo que es la Obra Pública, la cual se desenvuelve en general, en Argentina, con recursos relativamente escasos. Es por ello que la mejor solución técnico-ambiental debe ser también económicamente viable, dado que de no serlo la misma quedaría descartada frente a otra solución de menor costo económico en pos de satisfacer la necesidad de movilidad con los recursos disponibles.

2. OBJETIVO

El objetivo principal del presente trabajo consiste en comparar los resultados del Análisis del Ciclo de Vida de una mezcla asfáltica convencional respecto a otras del tipo “sustentables”, que contengan residuos plásticos, neumáticos fuera de uso y mezclas asfálticas templadas. Se evaluará, dentro de un paquete estructural, la influencia de usar residuos reciclados y mezclas confeccionadas con menores temperaturas.

Específicamente se pretende:

- Elegir las distintas mezclas asfálticas a estudiar y comparar. Las mismas deben contar con alguna característica que reduzca el impacto ambiental de su implementación, en comparación con el uso de mezclas convencionales.
- Diseñar diferentes paquetes estructurales de pavimentos flexibles que sean estructuralmente equivalentes entre sí cambiando la mezcla asfáltica de la capa de base. Estas mezclas incluyen las de control y aquellas con características sustentables
- Realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los paquetes estructurales diseñados evaluando el Potencial de Calentamiento Global (GWP) para el enfoque “de la cuna a la puerta”.
- Analizar el enfoque económico.
- Analizar las soluciones desde un punto de vista técnico-económico-ambiental

3. ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

3.1. Análisis estructural de pavimentos flexibles

El diseño estructural de pavimentos flexibles consiste en el cálculo de los espesores de las capas constituyentes y, como para el dimensionamiento de cualquier estructura de ingeniería, es necesario conocer las cargas actuantes, la resistencia de los materiales involucrados y las propiedades del suelo sobre el que se va a fundar el conjunto.

En Argentina, los métodos convencionalmente más utilizados para diseño de espesores de las distintas capas de pavimentos flexibles son el Método AASHTO '93 y el método SHELL '78, ambos aceptados por la Dirección Nacional de Vialidad (DNV). En general, se diseña con AASHTO '93 y luego se verifican los resultados mediante cualquier otro método.

El método Shell '78 es un método de diseño racional basado en la teoría de la elasticidad, que considera dos criterios de falla de la estructura: por fatiga y por ahuellamiento. El método permite definir los espesores de las distintas capas de la estructura de pavimento mediante una serie de cartas de diseño, las cuales representan la envolvente de falla.

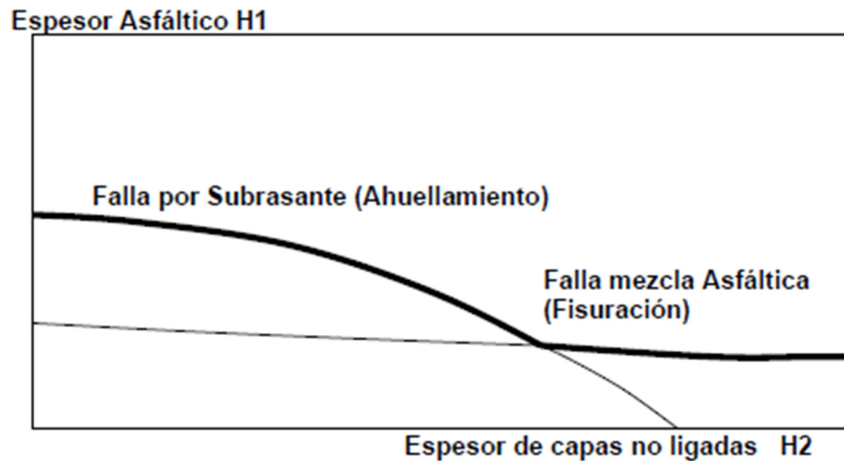


Figura 1 – Esquema de carta de diseño Shell '78

Las curvas consideran las solicitaciones de tránsito (número de repeticiones de un eje estándar de 80 kN) y del clima (a través de la temperatura ambiente) y también las propiedades mecánicas de la subrasante y de los materiales de las capas constitutivas.

Se modela la estructura como un sistema de tres capas (capa ligada, capa no ligada y subrasante) cada una de las cuales se compone de un material elástico lineal, homogéneo e isótropo, caracterizado por su espesor, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. Se considera que el pavimento llega a la falla por fatiga (fisuración por deformación específica horizontal de tracción en la base de las capas asfálticas) o por ahuellamiento (deformación específica vertical de compresión en la superficie de la subrasante).

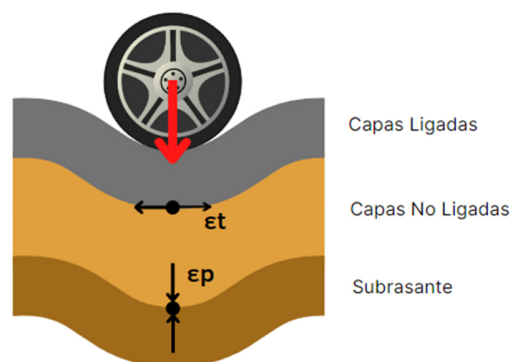


Figura 2 – Tensiones horizontales y verticales que conducen a la falla por fatiga o por ahuellamiento, respectivamente. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, el método AASHTO '93 es un procedimiento empírico de diseño de pavimentos que surge de la generalización de los resultados del "AASHTO ROAD TEST" (Ottawa, Illinois. 1956 – 1962) en el cual se realizaron estudios del comportamiento en servicio de distintas estructuras de pavimento, con

el objetivo de emplear tales datos en la etapa de diseño. El método se basa en la determinación del número estructural SN, a partir de una fórmula que involucra el número de repeticiones de un eje estándar de 18 kip (kilopounds), un factor de confiabilidad, el módulo resiliente M_r de la subrasante y la pérdida de serviciabilidad ΔPSI (parámetro asociado a la percepción de la calidad del camino, que define el deterioro admisible en la vida útil de la estructura). A partir del SN necesario, obtenido a partir del despeje de la ecuación, se pueden definir los espesores de cada capa del paquete estructural. El criterio de falla del método es el ahuellamiento de la subrasante, por lo cual se determina el espesor de las distintas capas de la estructura a partir del SN a fin de proteger a la subrasante de esfuerzos que superen su capacidad.

Estos métodos fueron desarrollados para mezclas asfálticas convencionales [1] y, además, el método AASHTO, el más utilizado en nuestro país, no involucra análisis de tensiones y deformaciones. Estas cuestiones convierten a los métodos mencionados en modelos no aplicables para el diseño de estructuras que incluyan materiales no convencionales como son mezclas asfálticas con adición de plástico o caucho reciclado. Es por ello que en el presente estudio se busca orientar el análisis estructural hacia métodos empírico-mecanicistas (E-M), que consideren el comportamiento real y complejo de los concretos asfálticos bajo diferentes estados de cargas y estudien la respuesta estructural del conjunto.

Los métodos E-M se centran en la modelización del comportamiento estructural (tensiones, deformaciones y desplazamientos) efectuando el análisis capa por capa bajo la acción de solicitaciones. Para el cálculo de estos valores se suele utilizar un modelo de sistema elástico multicapa llevado adelante por un software de análisis estructural.

Una vez conocidos los estados de tensión y deformación de los diferentes puntos dentro del paquete estructural se los coteja con las leyes de falla de cada material, las cuales deben ser previamente definidas. Para ello, se formulan ecuaciones que vinculan el estado tensional y la resistencia del material con un número de ciclos admisible hasta la falla, el cual viene asociado a un criterio de falla (por ejemplo, un cierto % de fisuración o una determinada profundidad de huella).

Diversos autores y organismos [2] han desarrollado leyes de falla por fatiga y por ahuellamiento que son representativas del comportamiento in situ de las mezclas asfálticas. Estas leyes surgen de ensayos de laboratorio realizados sobre probetas, como el ensayo de viga de cuatro puntos (4PBT) (EN 12697- 26) o el Wheel Tracking Test (WTT) (EN 12697-22), y se calibran para que sean representativas del comportamiento in situ del pavimento. Estos ajustes se consiguen a partir de mediciones realizadas en tramos experimentales de pavimento, a lo largo de la vida útil del mismo.

En base a estas consideraciones, en el presente estudio se emplea el software BackViDe desarrollado en el IMAE por el Dr. Ing. Oscar Giovanón, el cual utiliza una metodología de diseño estructural de pavimentos flexibles basada en métodos empírico-mecanicistas con formulaciones calibradas para su aplicación en Argentina.

Por su parte, algunos autores [3] han empleado el software de diseño estructural de pavimentos AASHTOWare Pavement ME Design. Otros investigadores [4] han optado por el empleo de programas de análisis estructural y luego un dimensionamiento por métodos mecanicistas basado en ecuaciones existentes.

3.2. Análisis del ciclo de vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología pautada por las normas ISO 14040 y 14044 que permite, entre otras cosas, determinar y cuantificar los impactos ambientales generados durante el ciclo de vida (producción, distribución, uso, etc.) de un producto o servicio. Se utiliza para detectar posibilidades de optimización de procesos, comparar distintas alternativas de productos que cumplen la misma función y desarrollar estrategias de marketing, siempre buscando la reducción de impactos ambientales.

Es una metodología en desarrollo, cuya aplicación en pavimentos ha sido aceptada y llevada a cabo por diversos investigadores para medir y comparar los impactos ambientales de distintas soluciones estructurales. Inicialmente, el ACV fue destinado al análisis comparativo entre pavimentos rígidos y flexibles y a la evaluación de diversas estrategias de mantenimiento y rehabilitación. Sin embargo, luego de haber realizado un análisis de la bibliografía existente, se ha visto que una de las mayores tendencias en investigación sobre pavimentos, es la incorporación de residuos o productos que hayan cumplido su ciclo en otros procesos [5].

Según Huang [6], el uso de materiales reciclados en lugar de materia prima virgen conlleva a dos beneficios: liberar espacio en vertederos y reducir la explotación de recursos naturales, por lo que es una práctica que puede llevar a la construcción de caminos hacia un enfoque más sustentable. Sin embargo, el uso de materiales reciclados tiene como contrapartida la necesidad de acondicionamiento de los mismos para poder ser incorporados en las mezclas asfálticas y la posible emisión de lixiviados durante la vida del pavimento.

Con respecto a los residuos poliméricos, se sabe que su incorporación mejora las propiedades mecánicas de la mezcla y conduce a menores espesores, lo cual conlleva una reducción del uso de materiales y energía. Sin embargo, al tratarse de mezclas relativamente nuevas, no se tiene gran cantidad de información sobre su desempeño durante la vida útil del camino y no se pueden determinar

con certeza las necesidades de mantenimiento y rehabilitación. Esto impacta negativamente en los ACV que consideran estos procesos.

En base a las consideraciones anteriores, se concluye que la simple introducción de materiales reciclados no garantiza un resultado ambientalmente positivo. Aquí es donde se manifiesta la necesidad de llevar a cabo un ACV que considere el balance de estos aspectos positivos y negativos.

Algunos autores han estudiado esta situación para diversos tipos de materiales reciclados y arriban a diversas conclusiones. Rangelov et al [7] sostienen que la incorporación de **plásticos reciclados** en las mezclas asfálticas conduce a un incremento del impacto ambiental (entre 2,5% y 10,5% según la cantidad de plásticos) respecto a las mezclas convencionales. Esto se debe a las emisiones que genera el tratamiento necesario de los plásticos (recolección, separación, acondicionamiento, elaboración de pellets, etc.). Sin embargo, los autores plantean que el aumento de emisiones por incorporación de plásticos se ve contrarrestado cuando se logran, para estas mezclas, espesores un 12,5% menores. Finalmente, aclaran que es necesario contrastar las emisiones generadas por el tratamiento de los plásticos con el impacto ambiental que generaría su disposición en vertederos.

En base a esto, otros estudios [8][9] establecen que, en términos de impacto ambiental, es conveniente reciclar los plásticos o incinerarlos frente a disponerlos en vertederos. En un estudio conducido por Arce-Bastias [10] en Argentina se concluye que las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen en un 22% si se decide reciclar residuos plásticos posconsumo en vez de emplear materia prima virgen y disponer el plástico en vertederos.

Con respecto a los **NFU**, los resultados son similares. Bartolozzi et al. [11] comparan dos estructuras de pavimento, una con asfalto convencional y otra con caucho-asfalto, y concluyen que la alternativa que incorpora caucho tiene un 30% menos de impacto ambiental (en todas las categorías de impacto). Aclaran que el procesamiento del caucho incrementa un 10% el potencial de calentamiento global (GWP) pero que esto se revierte en la etapa de construcción gracias a los menores espesores requeridos. Farina et al. [12] estudian tres alternativas de pavimento: convencional (S), con caucho incorporado por vía seca (D) y con caucho incorporado por vía húmeda (W) y arriban a que los impactos ambientales son un 40% menores para W mientras que las otras dos alternativas (S y W) tienen impactos muy similares entre sí. Los mismos autores contrastan en otro estudio [13] las emisiones que genera el tratamiento del caucho con los impactos que se producirían si se lo dispusiera en vertederos, arribando a que la alternativa de reciclar es más favorable.

Por otro lado, las diferencias en términos de impacto ambiental entre las **mezclas templadas** y las elaboradas en caliente se encuentran únicamente en las emisiones generadas durante la etapa de producción de la mezcla. En este contexto, Mazumder et al [14] proponen reducir las emisiones de la

elaboración de mezcla asfáltica en caliente (CAC) en los porcentajes de la Tabla 1, y utilizar estos valores como emisiones de mezclas templadas. Esto conlleva en sus estudios a una reducción de GWP del 26% respecto al CAC. Por su parte, Hui Ma et al [15] arriban a que las emisiones de las mezclas templadas son un 23,6% menor que las del CAC. Los mismos autores comentan que Qing et al. obtuvieron una reducción del 22,1% luego de medir las emisiones generadas durante la producción de CAC y de mezclas templadas.

Tabla 1 - Reducción de emisiones por producción de mezclas templadas respecto a CAC [14]

Emisiones que genera la producción de CAC	Reducción por el uso de mezclas templadas	Factor*
CO	8	0.92
NO _x	60	0.40
CO ₂	35	0.65
SO ₂	25	0.75
VOC	50	0.50

$$* LCI_{\text{TEMPLADAS}} = LCI_{\text{CAC}} * \text{factor} \quad \text{donde } LCI = \text{inventario de ciclo de vida}$$

Por todo lo expuesto, se estima que las mezclas con adición de materiales reciclados y las mezclas templadas tienen potencial de reducción de impactos ambientales respecto a las mezclas convencionales. Por ello, se pretende cuantificar estos impactos a través de un ACV con el objetivo de dar con la solución menos nociva para el ambiente.

4. SELECCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS A ESTUDIAR

Las mezclas a considerar en el presente estudio son:

- 1) CAC CA 20 SBVS: mezcla asfáltica con Silo-Bolsa por Vía Seca.
- 2) CAC CA 20 SBVH: mezcla asfáltica con Silo-Bolsa por Vía Húmeda.
- 3) CAC CA 20 BVS: mezcla asfáltica con Bidones por Vía Seca.
- 4) CAC CA 20 BVH: mezcla asfáltica con Bidones por Vía Húmeda.
- 5) CAC CA 20 3M: mezcla asfáltica con 3% de polietileno (PE) Micronizado.
- 6) CAC CA 20 NFU: mezcla asfáltica con caucho proveniente de Neumáticos Fuera de Uso.
- 7) ECSE MTE: mezcla templada con Emulsión asfáltica Catiónica Súper Estable.

- 8) CAC D 19 CA30: Concreto Asfáltico en Caliente de tipo Denso con cemento asfáltico tipo CA30.
- 9) CAC D 19 AM3: Concreto Asfáltico en Caliente de tipo Denso con Asfalto Modificado tipo AM-3.
- 10) CAC D 19 AAMP: Mezcla asfáltica de alto módulo con cemento asfáltico altamente modificado con polímeros.

Las mezclas 8, 9 y 10 son consideradas como mezclas asfálticas de control que se estudian con el fin de comparar resultados. A continuación, se realiza una descripción de cada una de las 10 mezclas a estudiar.

4.1. Mezclas asfálticas con adición de plásticos reciclados

Se analizan 4 mezclas asfálticas en caliente del tipo densas (CAC D) (denominación según especificaciones técnicas de Vialidad Nacional [16]) con aporte de plásticos reciclados provenientes de silo-bolsas (polietileno de baja densidad, PEBD) y de bidones de fitosanitarios (polietileno de alta densidad, PEAD) en desuso, tanto por vía seca (VS) como por vía húmeda (VH). El cemento asfáltico de base para estas mezclas es del tipo CA-20 [16]. Estas cuatro mezclas a utilizar fueron diseñadas y caracterizadas por Angelone et al [17] en estudios anteriores:

- 1) CAC CA 20 SBVS: mezcla asfáltica con Silo-Bolsa por Vía Seca
- 2) CAC CA 20 SBVH: mezcla asfáltica con Silo-Bolsa por Vía Húmeda
- 3) CAC CA 20 BVS: mezcla asfáltica con Bidones por Vía Seca.
- 4) CAC CA 20 BVH: mezcla asfáltica con Bidones por Vía Húmeda.

De tales investigaciones se toman para el presente informe la composición volumétrica, las propiedades mecánicas y las curvas maestras de módulo dinámico de las mezclas asfálticas. Tales propiedades se enuncian en la Tabla 2. Para las mezclas elaboradas por VS se incorpora un 2% de plásticos sobre el total de la mezcla (en peso) y, para VH, un 3% de plástico respecto al porcentaje en peso de asfalto (0.15% sobre el total de la mezcla).

La mezcla N° 5 [18] es también una mezcla asfáltica en caliente de tipo densa (CAC D) con cemento asfáltico CA-20 e incorporación de un 3% de polietileno micronizado (PE) por vía seca. Se añaden 30kg de plástico por tonelada de mezcla.

- 5) CAC CA 20 3M: mezcla asfáltica con 3% de polietileno (PE) Micronizado.

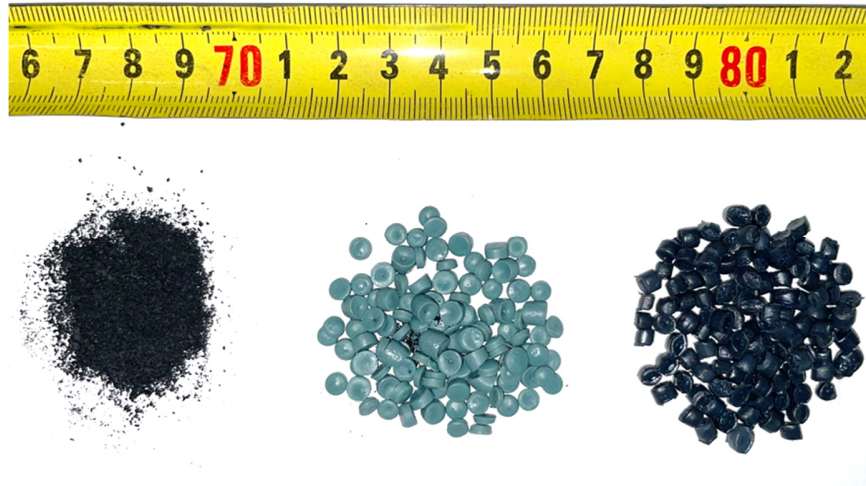


Figura 3 – Izq a Der: PE Micronizado (M), Pellets de Bidones (B), Pellets de Silobolsas (SB)

4.2. Mezclas asfálticas con adición de caucho

Se analiza una mezcla asfáltica en caliente de tipo densa CAC CA20 con aporte de polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso (NFU), el cual se incorporará por vía húmeda.

La mezcla fue diseñada y caracterizada por Cauhapé Casaux et al [19] en un estudio anterior. Del mismo se toman para el presente informe la composición volumétrica, las propiedades mecánicas y las curvas maestras de la mezcla asfáltica. Tales propiedades se enuncian en la Tabla 2.

- 6) CAC CA 20 NFU: mezcla asfáltica con caucho proveniente de Neumáticos Fuera de Uso. Porcentaje en peso de NFU: 10%

4.3. Mezclas asfálticas templadas

En este caso se trata de una mezcla semidensa en la que el ligante es una emulsión bituminosa catiónica súper estable (ECSE). Para la producción de la misma, los agregados se calientan a aproximadamente 120°C y la emulsión bituminosa a alrededor de 60°C. De esta manera, la temperatura de mezcla y compactación resulta entre 80 y 90 ° C.

La mezcla en cuestión fue diseñada y caracterizada por Martínez et al [20] en un estudio anterior. Al igual que antes, se toman para el presente informe la composición volumétrica, las propiedades mecánicas y las curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla asfáltica. Tales propiedades se detallan en la Tabla 2.

- 7) ECSE MTE: mezcla templada con emulsión asfáltica.

4.4. Mezclas asfálticas de control

4.1.1. Mezcla asfáltica convencional de tipo densa

Se trata de una mezcla asfáltica en caliente de tipo densa, elaborada con un asfalto convencional que se clasifica según su viscosidad como CA30. El tamaño máximo nominal del agregado para esta mezcla es de 19mm. Las propiedades de la misma se enuncian en la Tabla 2 y constituye la mezcla base de referencia a emplear con fines comparativos.

- 8) CAC D 19 CA30: Concreto Asfáltico en Caliente de tipo Denso (Tamaño máximo nominal.: 19 mm)

4.1.2. Mezcla asfáltica con asfalto modificado

Se trata de una mezcla asfáltica elaborada con un asfalto modificado con polímeros, el cual se encuentra definido según la norma IRAM 6596 [21] como AM3. Es un concreto asfáltico en caliente de tipo denso. El tamaño máximo nominal del agregado es de 19mm. Las propiedades de esta mezcla se enuncian en la Tabla 2.

- 9) CAC D 19 AM3: Concreto Asfáltico en Caliente de tipo Denso con Asfalto Modificado tipo AM3. (Tamaño máximo nominal 19 mm)

4.1.3. Mezcla asfáltica de alto módulo

En las mezclas asfálticas de alto módulo se utiliza un ligante asfáltico altamente modificado con polímeros (7,5% en peso de polímero) AAMP. La normativa española [22] de la Asociación Técnica de Carreteras define a las mezclas asfálticas de alto módulo como mezclas tales que su módulo dinámico a 20 °C y 10 Hz sea superior a 11.000 MPa (para mezclas convencionales el valor ronda los 6.000 MPa). Las mismas se pueden emplear en capas intermedias o de base con espesores comprendidos entre 6 y 13 cm. En este caso, la mezcla a utilizar es de tipo densa y se emplea un ligante asfáltico tipo AM2 / Pen 20-30 [16] [21]. El tamaño máximo nominal del agregado es de 19mm. Las propiedades de esta mezcla se enuncian en la Tabla 2.

- 10) CAC D 19 AAMP: Mezcla asfáltica de alto módulo. (Tamaño máximo nominal.: 19 mm).

Tabla 2 - Propiedades de las mezclas asfálticas a estudiar.

Nº	Denominación	Densidad [kg/dm ³]	Dens Teor Max [kg/dm ³]	Vacíos [%]	VAM [%]	RBV [%]	Contenido de ligante [%peso]	Contenido de material reciclado [%peso]
1	CAC CA20 SBVS	2,325	2,443	4,8	16,4	70,8	5,00	2,00
2	CAC CA20 SBVH	2,447	2,540	3,7	15,9	77,0	5,00	0,15
3	CAC CA20 BVS	2,300	2,465	6,7	18,2	63,4	5,00	2,00
4	CAC CA20 BVH	2,426	2,557	5,1	17,2	70,4	5,00	0,15
5	CAC CA20 3M	2,340	2,450	4,0	15,0	71,0	4,70	3,00
6	CAC CA20 NFU	2,446	2,608	6,1	17,6	65,3	4,70	0,47
7	ECSE MTE	2,428	2,550	4,8	16,9	71,7	5,00	-
8	CAC D19 CA30	2,414	2,562	5,8	17,9	67,7	5,00	-
9	CAC D19 AM3	2,460	2,588	4,9	16,5	70,1	4,70	-
10	CAC D19 AAMP	2,532	2,638	4,0	14,7	72,5	4,20	-

Tabla 3 - Resultados de ensayos realizados sobre las mezclas asfálticas a estudiar.

Nº	Denominación	Estabilidad [kN]	Fluencia [mm]	E/F [kN/mm]	Resist. Conservada [%]
1	CAC CA20 SBVS	17,4	5,04	3,5	93,0
2	CAC CA20 SBVH	12,3	4,88	2,5	99,0
3	CAC CA20 BVS	20,5	6,59	3,1	85,0
4	CAC CA20 BVH	13,2	4,28	3,1	72,0
5	CAC CA20 3M	23,8	4,70	5,0	96,0
6	CAC CA20 NFU	11,4	3,80	3,0	92,8
7	ECSE MTE	3,8	3,20	1,2	s/d
8	CAC D19 CA30	12,2	3,90	3,1	59,0
9	CAC D19 AM3	13,6	4,80	2,8	95,0
10	CAC D19 AAMP	16,7	3,00	5,6	s/d

4.5. Curvas Maestras de Módulo Dinámico de las mezclas seleccionadas

El módulo dinámico E^* es una propiedad mecánica de los materiales visco-elásticos y define la relación entre las tensiones y las deformaciones que sufre el material cuando se lo somete a sollicitaciones vibratorias u oscilatorias (Figura 4). E^* simboliza la respuesta (deformación) de la mezcla asfáltica ante la aplicación de cargas, en función de la temperatura y velocidad de aplicación de la carga.

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} [MPa] \quad (1)$$

Donde:

σ_0 : amplitud de la tensión aplicada (carga sinusoidal)

ε_0 : amplitud de deformación resultante bajo la aplicación de carga sinusoidal

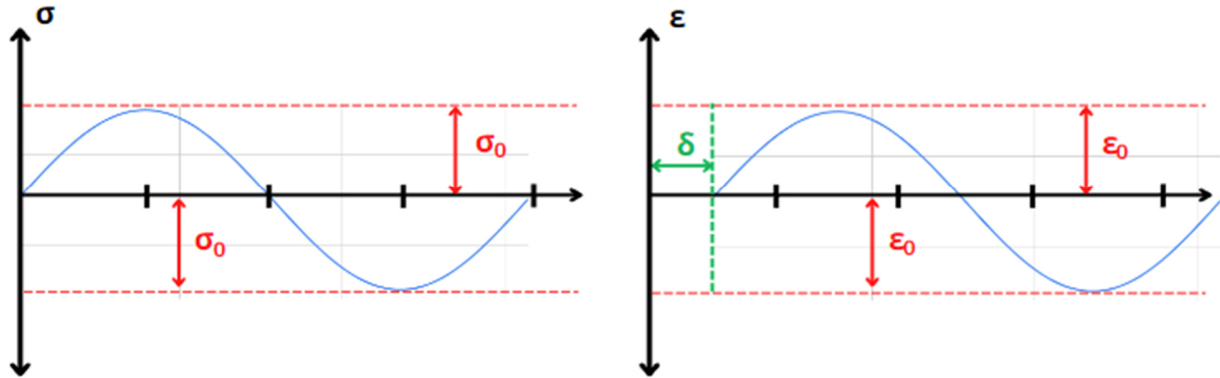


Figura 4 – Esquema de carga (izquierda) y respuesta del material (derecha). Fuente: elaboración propia.

Se estudia el comportamiento de las mezclas asfálticas a utilizar bajo diferentes condiciones de temperatura y frecuencia. Se emplean en el presente estudio las curvas maestras obtenidas en investigaciones anteriores [17] [19] [20]. Tales curvas describen la variación del módulo dinámico E^* en función de la frecuencia (Hz) y la temperatura (°C) basándose en las ecuaciones (2) y (3):

$$\log E^* = \log E^*_{min} + \frac{\log E^*_{max} - \log E^*_{min}}{1 + e^{(\beta + \log f * \gamma)}} \quad (2)$$

$$f = f_r * e^{K * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)} \quad (3)$$

Donde:

E^*_{max} : valor asintótico al que tiende el módulo de la mezcla para frecuencias elevadas o bajas temperaturas

E^*_{min} : valor asintótico al que tiende el módulo de la mezcla para frecuencias bajas o elevadas temperaturas

β, γ, K : parámetros de ajuste del modelo

T_{ref} : temperatura de referencia

f_r : frecuencia

T: temperatura

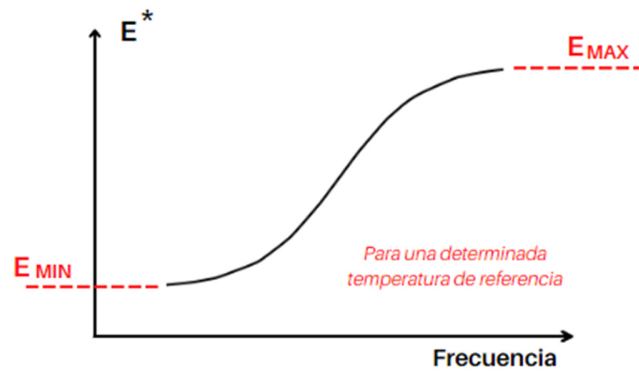


Figura 5 - Esquema de curva maestra de modulo dinámico.

En la Tabla 4 se presentan los parámetros necesarios para definir las curvas de cada una de las mezclas utilizadas.

Tabla 4 - Parámetros de las curvas maestras de las mezclas.

Nº	Denominación	Emin [MPa]	Emax [MPa]	Log Emin [MPa]	Log Emax [MPa]	β	γ	K	T ref [°C]
1	CAC CA20 SBVS	129,33	20031,78	2,11	4,30	-0,56	-0,52	24126,89	25
2	CAC CA20 SBVH	31,98	24403,43	1,50	4,39	-0,75	-0,49	22903,00	25
3	CAC CA20 BVS	163,44	20669,84	2,21	4,32	-0,56	-0,52	25170,24	25
4	CAC CA20 BVH	58,20	22437,98	1,76	4,35	-0,95	-0,51	23273,24	25
5	CAC CA20 3M	1,00	54294,41	0,00	4,73	-1,27	-0,22	23764,13	25
6	CAC CA20 NFU	171,44	17898,60	2,23	4,25	-0,28	-0,65	23882,72	25
7	ECSE MTE	19,39	21739,90	1,29	4,34	-0,29	-0,57	19385,28	25
8	CAC D19 CA30	118,00	30199,00	2,07	4,48	0,29	-0,78	19910,60	25
9	CAC D19 AM3	19,63	52105,66	1,29	4,72	-0,49	-0,32	24682,41	25
10	CAC D19 AAMP	122,38	30995,99	2,09	4,94	-0,15	-0,63	21154,78	25

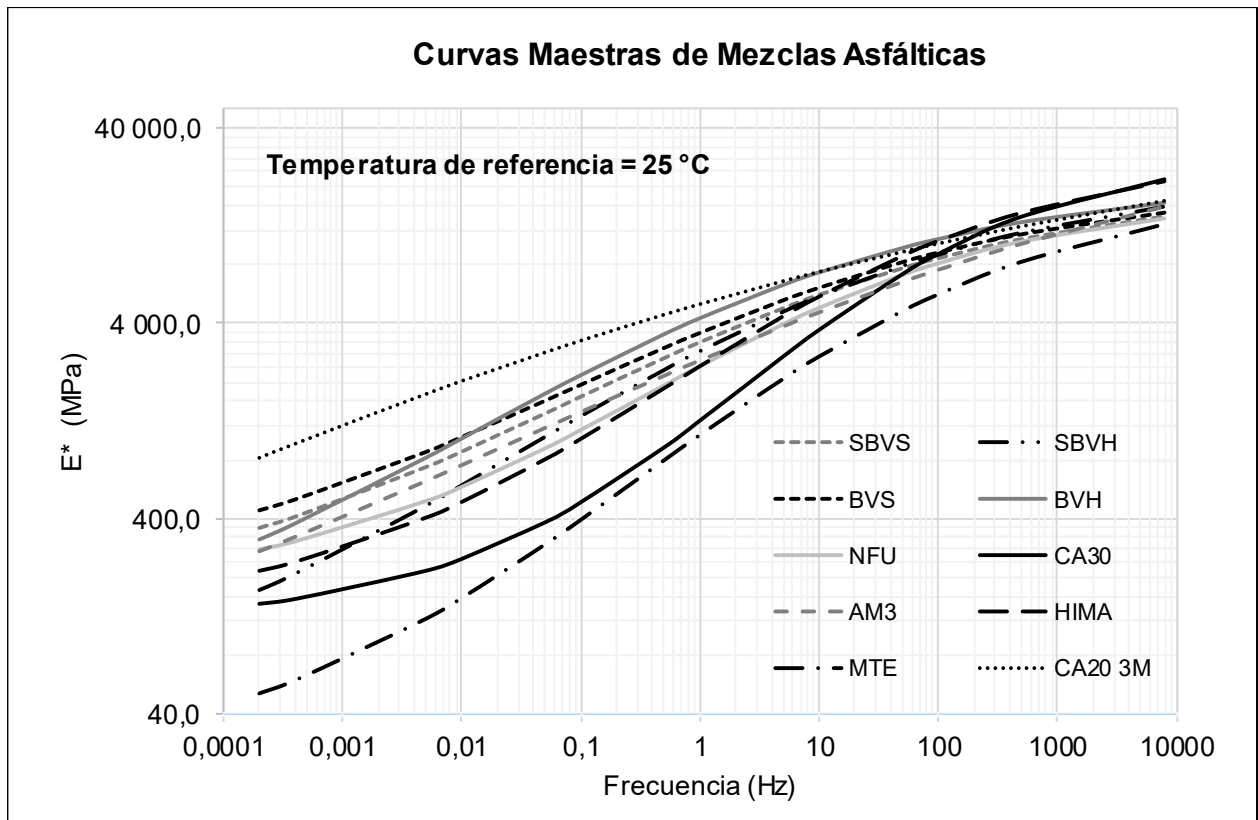


Figura 6 - Curvas maestras de las mezclas asfálticas

4.6. Leyes de falla por Fatiga

Las leyes de falla por fatiga indican la cantidad de repeticiones requeridas de un determinado esfuerzo que conduce a la falla del material. Uno de los métodos para determinar la ley de falla por fatiga de una mezcla asfáltica es el ensayo de viga a flexión en 4 puntos (4PBT) (UNE-EN 12697-24), en el cual se somete a una viga de sección cuadrada de 50 mm de lado y 40 cm de longitud de concreto asfáltico a cargas de flexión cíclicas y se cuenta la cantidad de ciclos hasta la falla. Ensayando el mismo material a diferentes deformaciones específicas (ensayo a deformación constante) se puede obtener una ley de falla con la forma de la ecuación (4).

$$\epsilon t = a * N^b \quad (4)$$

Donde,

ϵt : Deformación específica de tracción horizontal.

N : Número de reiteraciones del esfuerzo ϵt admisibles.

a, b : Coeficientes de ajuste.



Figura 7 - Ensayo de viga a flexión en 4 puntos [23].

Para las mezclas con adición de plástico y caucho (SBVS, SBVH, BVS, BVH, NFU) no se cuenta con resultados de 4PBT, por tal razón, se procede a la realización de un estudio bibliográfico con el objetivo de encontrar resultados de ensayos 4PBT de mezclas similares y poder aplicar las leyes de falla por fatiga obtenidas en tales estudios.

Entonces, se toman como referencia los resultados de las investigaciones realizadas por Lastra-González et al [24] para polietilenos (PE) y neumáticos fuera de uso ELT (End of Life Tires). Esta decisión se basa en la similitud del comportamiento reológico y de los valores del módulo dinámico de la mezcla PE con las mezclas SBVS, SBVH, BVS y BVH y, por otro lado, la semejanza de la mezcla ELT con la NFU. Se incorporan en la Figura 8 y la Figura 9 los gráficos comparativos de las curvas maestras de módulo dinámico, en las que se detalla una franja de variación de $\pm 30\%$ respecto a la mezcla de la bibliografía, que se considera el desvío usual de los valores de módulo dinámico para una misma mezcla. En la Tabla 5 y Tabla 6 se añade una comparativa de la composición de las mezclas.

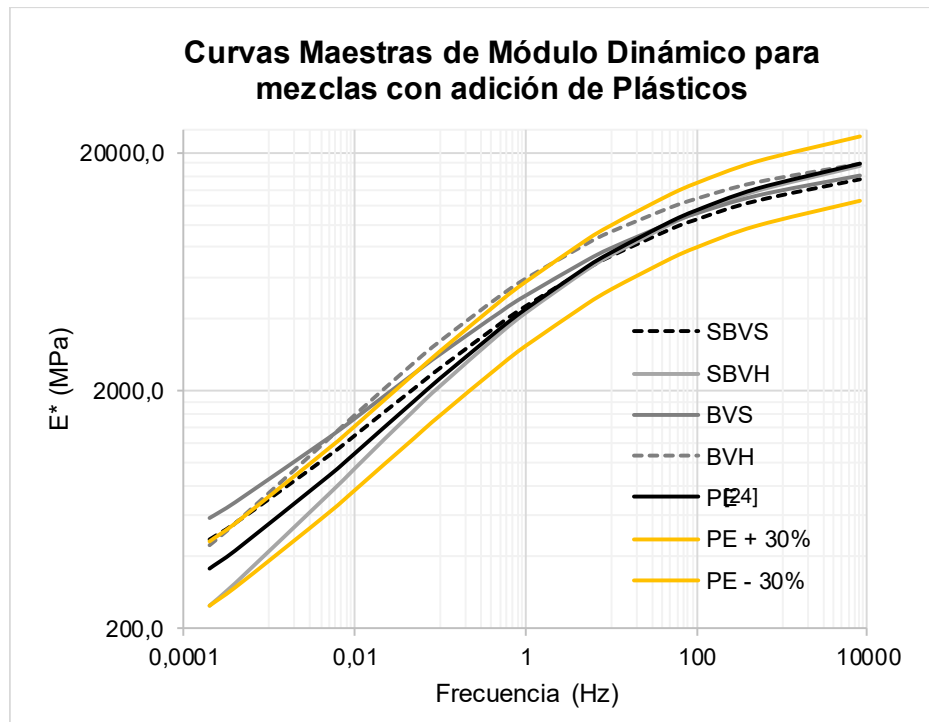


Figura 8 - Comparación de curvas maestras entre mezclas con plástico propias y de bibliografía [24].

Se observa en la Figura 8 como el comportamiento reológico de la mezcla PE se aproxima en buena medida al conjunto de mezclas con incorporación de plástico reciclado, pudiendo adoptarse PE como representativa de las demás.

Tabla 5 - Comparación de propiedades de mezclas con plástico propias y de bibliografía [24].

Ensayos	Unidad	SBVS	SBVH	BVS	BVH	PE
Origen	-	Propia	Propia	Propia	Propia	[24]
Densidad	kg/dm ³	2,325	2,447	2,3	2,426	2,308
Contenido de ligante	% (peso)	5,00	5,00	5,00	5,00	4,80
Contenido de ligante	% (vol)	11,63	12,24	11,50	12,13	11,08
Vacios	%	4,8	3,7	6,7	5,1	4,7
WTSaire	mm/10 ³ ciclos	0,016	0,035	0,014	0,026	0,050

Por otro lado, una situación similar se observa en la Figura 9 para las mezclas con incorporación de caucho.

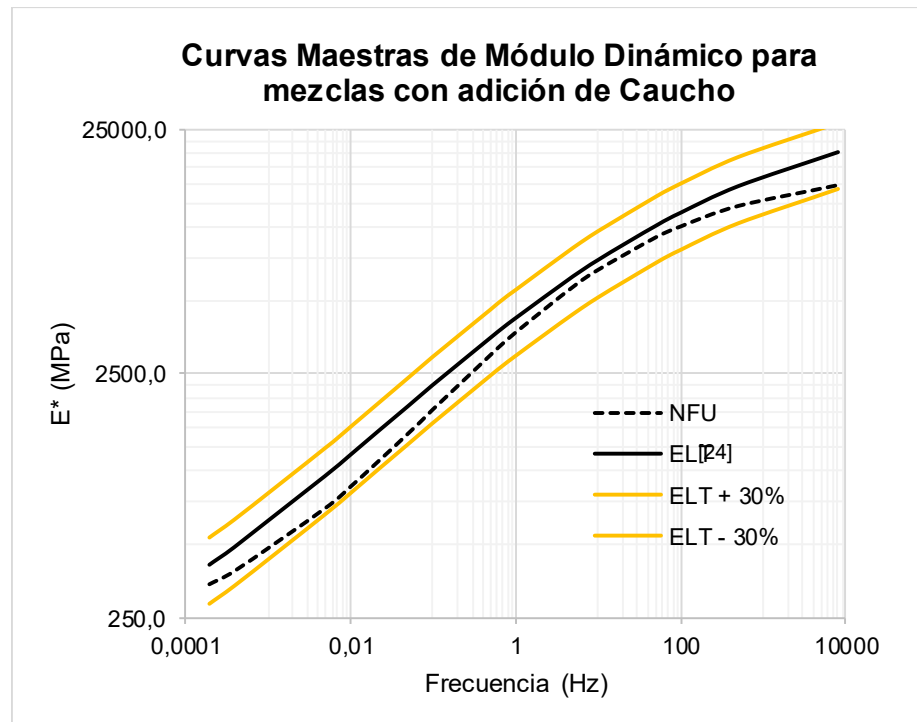


Figura 9 - Comparación de curvas maestras entre mezclas con caucho propias y de bibliografía [24]

Tabla 6 - Comparación de propiedades de mezclas con caucho propias y de bibliografía [24]

Ensayos	Unidad	NFU	ELT
Origen	-	Propia	[24]
Densidad	kg/dm ³	2,446	2,430
Contenido de ligante	% (peso)	4,70	4,80
Contenido de ligante	% (vol)	11,50	11,66
Vacíos	%	6,1	4,80
WTSaire	mm/10 ³ ciclos	0,041	0,070

Se concluye entonces que las leyes de falla obtenidas por [24] son aplicables a las mezclas del presente estudio [17] [19] [20]. Las leyes de falla extraídas de la bibliografía presentan la forma de la ecuación (4).

Tabla 7 - Parámetros leyes de falla por fatiga

	PE	ELT
a	2251	1408
b	-0.212	-0.158
ε₆ [10⁻⁶]*	121,2	159,1

*Deformación específica a 10⁶ ciclos.

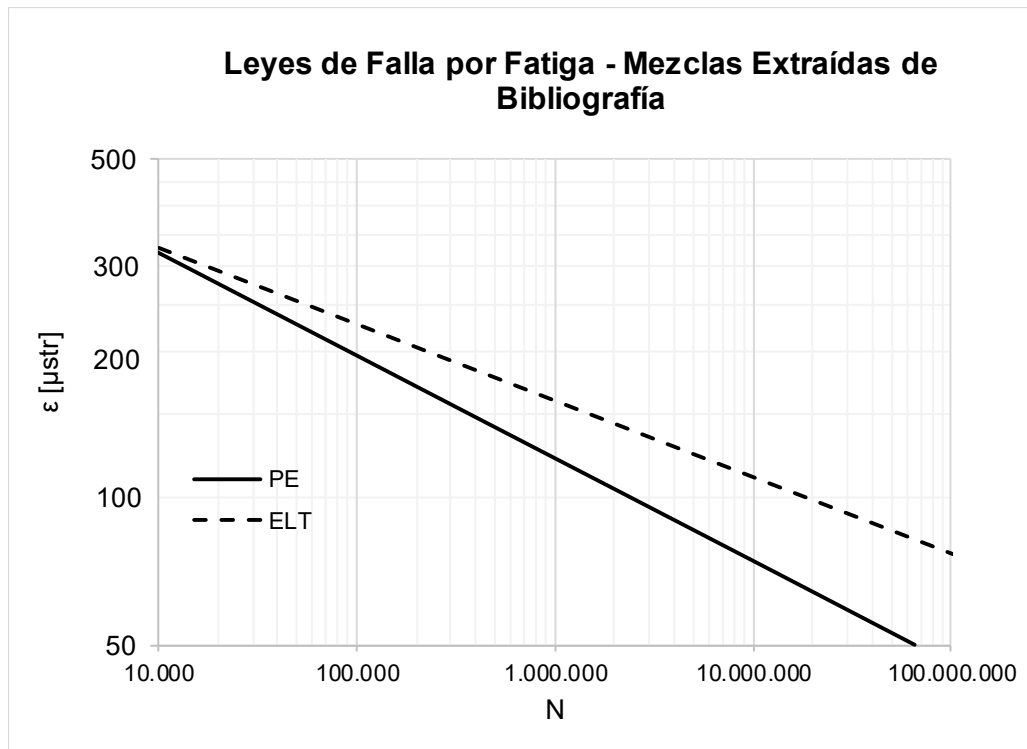


Figura 10 – Leyes de falla por fatiga de las mezclas extraídas de la bibliografía

Para las mezclas restantes (MTE, 3M, CA30, AM3, AAMP) se toman las leyes de falla elaboradas por el IMAE.

4.7. Leyes de falla por Ahuellamiento

En el diseño estructural de pavimentos, el espesor de las capas asfálticas se determina en base a dos criterios: limitar la deformación horizontal en la parte inferior de las capas ligadas (falla por fatiga) y limitar la deformación vertical en la subrasante (falla por ahuellamiento). La falla por ahuellamiento considera la acumulación de deformaciones permanentes en todo el paquete estructural y, en base a este criterio, se determina el espesor que deben tener las capas ligadas para poder proteger a las capas subyacentes. De esta manera, se dice que las capas ligadas fallan por fatiga (fisuras) y las no ligadas, por ahuellamiento (deformaciones permanentes).

Con este enfoque, el ahuellamiento propio de las capas ligadas no se considera como criterio de falla estructural. Sin embargo, el mismo sí debe ser tenido en cuenta en la etapa de diseño de mezclas. Es decir, si se tiene una mezcla altamente deformable, el problema se soluciona en la etapa de diseño de mezclas y no a partir de aumentar el espesor de las capas. Es por ello que se debe evaluar la deformabilidad de las mezclas a emplear para corroborar que las mismas mantengan su integridad durante la vida útil en servicio.

El Ensayo de Rueda de Carga (en inglés Wheel Tracking Test – WTT) es una prueba normalizada (IRAM 6850 / UNE-EN 12697-22) que permite evaluar el desempeño de una mezcla asfáltica frente al ahuellamiento. En el ensayo se miden las deformaciones permanentes que se producen en una placa de concreto asfáltico sometida a una carga cíclica que simula el paso de una rueda cargada. A diferencia del 4PBT, este ensayo sí se ha realizado para las mezclas en estudio.

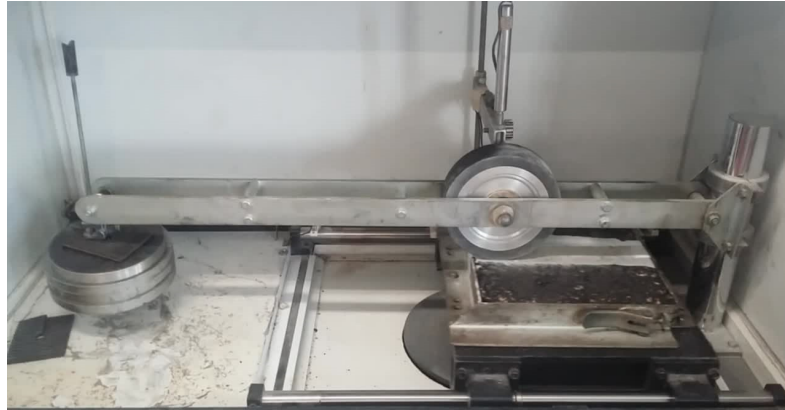


Figura 11 - Ensayo de Rueda de Carga

La Tabla 8 muestra los resultados del ensayo, donde:

$$PRaire [\%] = \frac{\text{Profundidad de huella para } 10^3 \text{ ciclos [mm]}}{\text{Espesor inicial de la probeta [mm]}} * 100 \quad (5)$$

$$WTSaire [mm/10^3 \text{ ciclos}] = \frac{H_j - H_i}{j - i} \quad (6)$$

Con:

$H_j; H_i$: profundidad de la huella en mm para el ciclo j o i , respectivamente.

$j; i$: cantidad de ciclos

$PRaire$: profundidad de ahuellamiento proporcional.

$WTSaire$: pendiente de ahuellamiento (Ver esquema Figura 12).

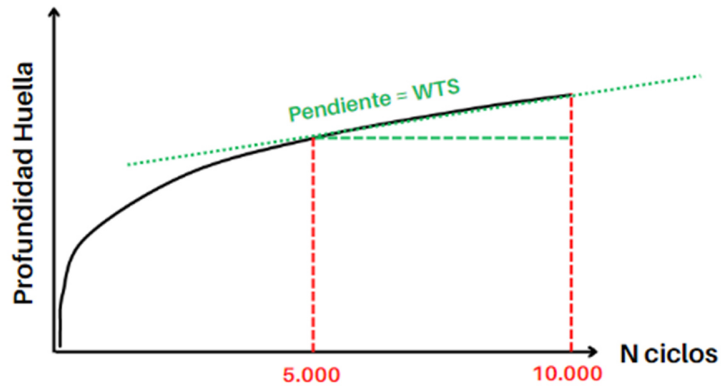


Figura 12 – Esquema de curva resultante de WTT.

En la Figura 13 se muestran las profundidades de huella obtenidas.

A partir del WTT, se pueden obtener las curvas de deformación permanente de las distintas mezclas (Figura 14). Las mismas responden a una ecuación del tipo (7) y surgen de la mejor aproximación de los puntos obtenidos en el ensayo.

$$\varepsilon_p = a * N^b \quad (7)$$

Donde,

ε_p : Deformación específica de compresión vertical.

N : Número de reiteraciones del esfuerzo ε_p .

a, b : Coeficientes de ajuste.

Los coeficientes a y b se muestran en la Tabla 8

Tabla 8 – Resultados de Wheel Tracking Test

Nº	Denominación	WTS [mm/ 10 ³ ciclos]	Pr (10 ³ ciclos) [%]	a	b
1	CAC CA20 SBVS	0,016	1,58	0,135	0,160
2	CAC CA20 SBVH	0,035	3,31	0,402	0,158
3	CAC CA20 BVS	0,001	3,79	1,175	0,053
4	CAC CA20 BVH	0,026	2,25	0,231	0,173
5	CAC CA20 3M	0,000	0,14	0,069	0,001
6	CAC CA20 NFU	0,041	3,60	0,384	0,170
7	ECSE MTE	s/d	s/d	s/d	s/d
8	CAC D19 CA30	0,054	3,44	0,188	0,242
9	CAC D19 AM3	0,039	2,50	0,139	0,240
10	CAC D19 AAMP	0,027	2,30	0,219	0,180

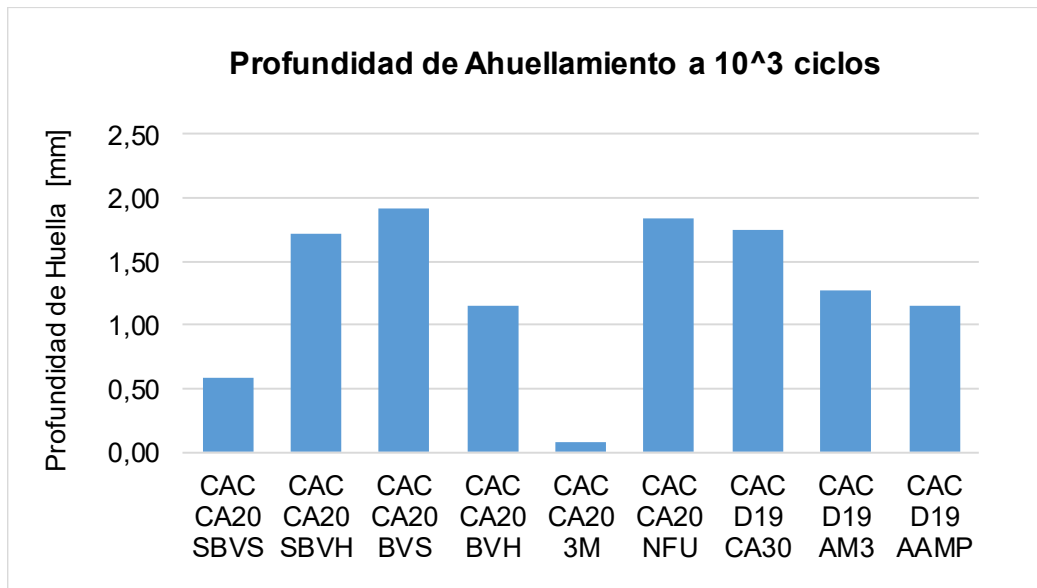


Figura 13 – Profundidad de huella.

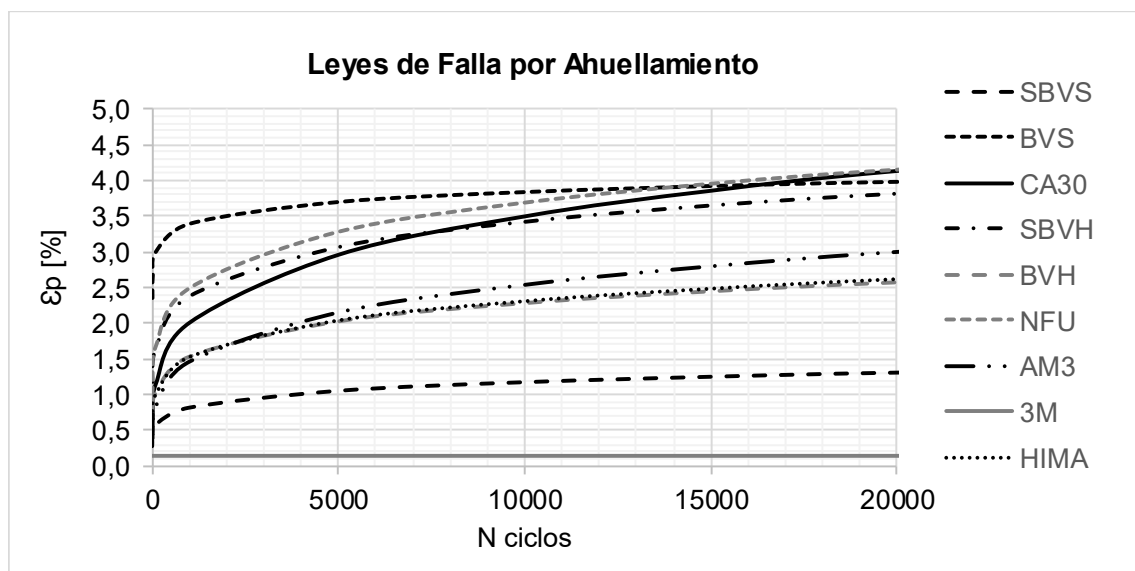


Figura 14 – Leyes de falla por ahuellamiento (resultados WTT).

En Argentina, los pliegos de especificaciones técnicas de la Dirección Nacional de Vialidad [16] establecen los valores máximos admisibles según el tipo de tránsito esperado. Las mezclas estudiadas cumplen con los requisitos más restrictivos (Tabla 9) por lo que se puede decir que se encuentran en buenas condiciones.

Tabla 9 – Normativa vigente sobre resistencia al ahuellamiento.

Pendiente Media de Deformación (WTS AIRE) [mm/1000 ciclos de carga] en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos y Profundidad Media de la Huella (PRD) [%]				
Tipo de capa	Clasificación por tránsito			
	T1	T2	T3	T4
Rodamiento	WTS aire $\leq 0,08$ PRD $\leq 5\%$	WTS aire $\leq 0,10$ PRD $\leq 8\%$	WTS aire $\leq 0,12$ PRD $\leq 10\%$	WTS aire $\leq 0,15$ PRD $\leq 10\%$
Base	WTS aire $\leq 0,10$ PRD $\leq 8\%$	WTS aire $\leq 0,12$ PRD $\leq 10\%$	WTS aire $\leq 0,15$ PRD $\leq 10\%$	WTS aire $\leq 0,15$ PRD $\leq 12\%$

5. DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Para llevar a cabo el diseño estructural del pavimento flexible se emplea un enfoque empírico mecanicista según lo expresado en 3.1. Estos métodos buscan modelar la respuesta de la estructura de pavimento bajo la acción de solicitaciones (clima y tránsito). Para realizar el modelo es necesario:

- Definir las constantes de caracterización de los materiales, que para materiales granulares dependen de las tensiones y para materiales viscoelásticos, como el concreto asfáltico, dependen de la temperatura y la frecuencia de aplicación de cargas.
- Simplificar las cargas de tránsito. Esto consiste en transformar las cargas ejercidas por cada tipo de vehículo a una cantidad equivalente de “ejes estándar de 80 kN” y calcular cuántos ejes pasarán por el pavimento durante la vida útil del mismo, definiendo así una cantidad de ciclos de carga que deberá resistir la estructura.
- Considerar las solicitaciones del clima transformando la temperatura media del aire a una temperatura media del asfalto.

Una vez establecido el modelo, se procede a realizar el análisis estructural para obtener las tensiones, deformaciones y desplazamientos de la estructura de pavimento. Luego, se debe definir un criterio de falla para la estructura y calcular cuántos ciclos de carga conducen a la misma. Como se mencionó en 3.1, se considera que los pavimentos fallan por fatiga o por ahuellamiento, por lo que los criterios de falla a establecer serán un determinado porcentaje de fisuración en superficie o una cierta profundidad de huella. Para calcular cuántos ciclos de carga conducen a la falla de la estructura se requieren las leyes de falla por fatiga o ahuellamiento de los materiales que componen cada capa del paquete estructural, las cuales establecen el número de repeticiones admisibles de un determinado esfuerzo. Finalmente, se contrasta el número de ciclos de carga que resiste la estructura con la cantidad que se

espera tener durante la vida útil del pavimento. Se itera con los materiales y espesores de cada capa hasta arribar a una solución adecuada.

5.1. Determinación de las solicitaciones

5.1.1. Cálculo de solicitaciones de tránsito: ESALs

En esta instancia se realiza el cálculo de solicitaciones de tránsito en términos de ejes equivalentes de 80 kN (ESALs). Se toma como base para el diseño comparativo la información de un tramo de una ruta nacional con un importante volumen de tránsito y alto porcentaje de vehículos pesados, la cual puede ser representativa de muchas de las rutas de la zona central del país

Para el cálculo del número de ejes equivalentes se utiliza la expresión (8):

$$ESALs = TMDA_0 * Fd * Fc * Fa * Fp * (\%veh_i * FC_i) \quad (8)$$

Donde:

$TMDA_0$: tránsito medio diario anual.

Fd : factor de direccionalidad (% de vehículos que viajan en uno u otro sentido).

Fc : factor de carril (% de vehículos que viajan en el carril más cargado).

Fa : cantidad de días comprendidos en un año (días que componen el TMDA).

Fp : factor de crecimiento del tránsito durante la vida útil de la estructura.

$\%veh_i$: porcentaje de vehículos pesados.

FC_i : factor de camión (transforma el daño de un determinado vehículo al daño de un eje estándar).

Se escoge estudiar un tramo de la mencionada ruta que posee un TMDA intermedio y para el cual se cuenta con una valoración confiable de los factores de camión.

5.1.1.1. Elección de parámetros y recopilación de información para estimación de ESALs

- Tránsito diario medio anual: TMDA (Fuente: Vialidad Nacional)

Se toma como $TMDA_0$ el correspondiente al año 2019. Se desprecian los datos obtenidos para los años 2020 y 2021 en el marco de la pandemia Covid-19 por ser los mismos de carácter no representativo.

Tabla 10 - TMDA RN 11 km 1007.79 a km 1044.76

Año	TMDA
2013	6367
2014	6577
2015	6760
2016	6902
2017	7428
2018	7051
2019	6611

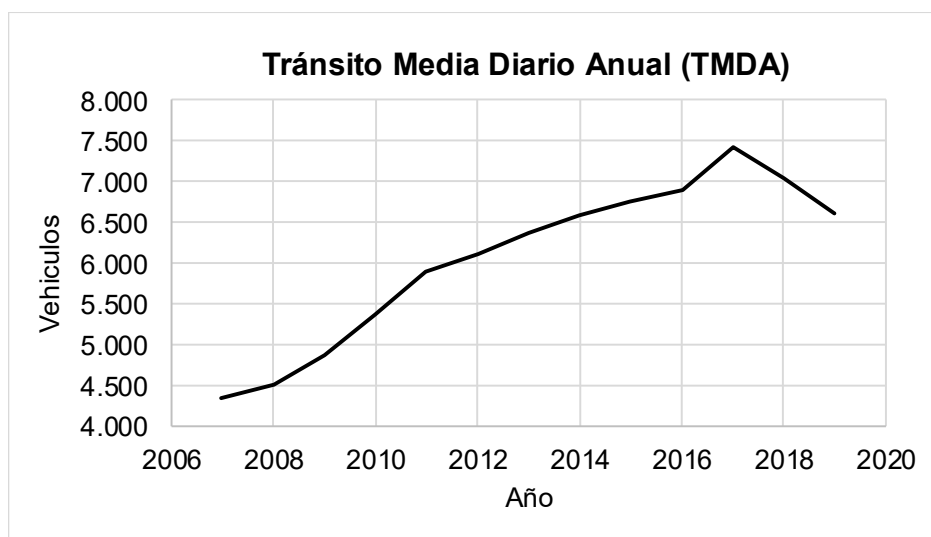


Figura 15 – Evolución del TMDA en el tiempo

- Coeficiente de direccionalidad: $F_d = 0.6$
- Dirección: Asc: 40% Desc: 60%

Se mantienen estas proporciones en todo el periodo 2013 - 2019 (Fuente: Vialidad Nacional) y se estima que permanecerán de esta manera en el futuro.

- Coeficiente de carril: $F_c = 1$ (Se trata de una ruta con 1 carril para cada sentido)
- Días asociados al TMDA: $F_a = 365$ días


5.1.1.2. Clasificación vehicular y factores de camión.

Se obtienen datos correspondientes a la clasificación vehicular para el año 2019, en el tramo de estudio (Fuente: Vialidad Nacional).

Para cada tipo de vehículo se determina un factor de camión (FC) el cual representa la cantidad de pasadas de un eje estándar (1 eje de 80kN con ruedas duales) que equivale a una pasada del vehículo en cuestión, en términos de efecto destructivo.

Pagola et al. [25] realizaron mediciones del peso total y peso por eje del tránsito de la RN 11, en una báscula ubicada en una ruta nacional, durante el período 2013 - 2017. Se observó que los vehículos pesados circulaban con cargas mayores a las permitidas por ley. A partir de tales mediciones, los autores calcularon los FC para cada clasificación vehicular, en sentido ascendente y descendente. Se asignan en el presente trabajo aquellos correspondientes al sentido descendente, dado que se asocia a la dirección de circulación predominante.

Tabla 11 - Distribución vehicular

DISTRIBUCIÓN VEHICULAR Y FACTORES DE CAMIÓN				
Tipo	Denominaciones		%	FC
	S1D1	SA1	6,3	1,13
	S1D2 - S1D3	SA2	0,5	0,93
	S1D1D1D1	CA1	0,4	1,52
	S1D1D1D2	CA2	2,8	5,96
	S1D2D1D2	CA3	0,1	5,50
	S1D1D1	SE1	0,6	2,00
	S1D1D2	SE2	4,4	1,08
	S1D1D3	SE3	2,25	3,56
	S1D2D2		2,25	2,91
	S1D2D3	SE4	0,2	2,84

5.1.1.3. Crecimiento anual del tránsito

Se proyecta para la estructura una vida útil de 15 años a comenzar en 2022. Para realizar la proyección se emplean las ecuaciones (9) y (10):

$$TMDAn = TMDA_0 * (1 + r)^n \quad (9)$$

$$Fp * TMDA_0 = \sum_{n=1}^{20} TMDAn \quad (10)$$

El valor de “r” se define igual 4,23% a partir de analizar la tendencia de crecimiento del TMDA.

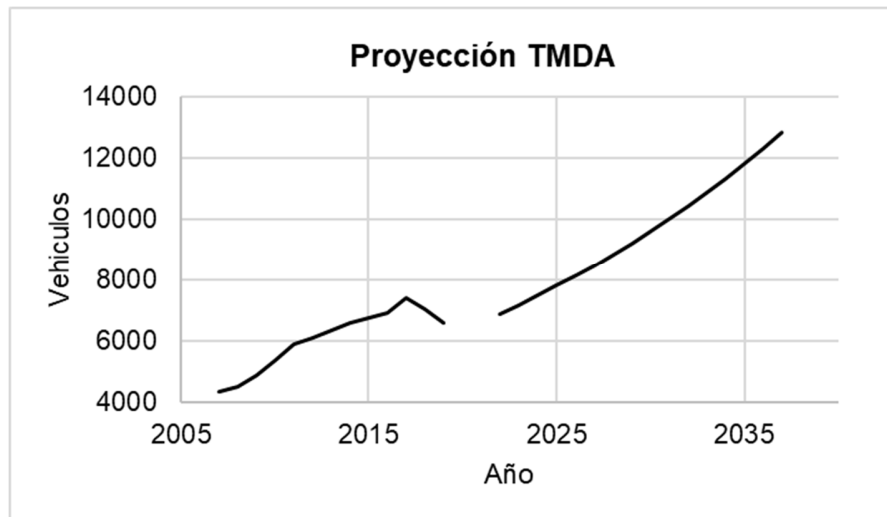


Figura 16 – Proyección TMDA en el periodo de diseño

Finalmente, se llega a un $TMDA_{ACUMULADO} = 146.295$ vehículos.

5.1.1.4. Cálculo ESALs

Para el cálculo del número de ejes equivalentes (80 kN) se utiliza la ecuación (8) presentada anteriormente:

$$ESALs = TMDA_{ACUMULADO} * Fd * Fc * Fa * (\%veh_i * FC_i) \quad (11)$$

Se tiene entonces:

$$ESALs = 146.295 * 0,6 * 1 * 365 * 0,465075 = 14.900.354 \text{ ejes}$$

5.1.2. Solicitaciones asociadas a las condiciones climáticas.

En relación a las solicitaciones de clima, se elige trabajar con una temperatura promedio para el módulo “Vida” del software BackViDe. Según el mapa de Temperaturas Medias Mensuales [26] del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) se tiene que la temperatura media mensual para los meses de enero (verano) y julio (invierno) en la zona de emplazamiento del tramo adoptado para el estudio son:

- Temperatura media mensual ENERO: 26.5 °C
- Temperatura media mensual JULIO: 14.5 °C

Luego,

- Temperatura PROMEDIO: 20.5 °C = 68.9 °F

Se decide calcular la temperatura del asfalto a una profundidad de 5 cm medida desde la superficie. Se toma como criterio para esta selección considerar una profundidad igual a un tercio del espesor total de la capa asfáltica. Como se tienen distintos espesores porque se estudian distintas mezclas se toma un espesor estimado promedio de 15cm.

Según Witczak (1972) [27]:

$$MPT = MAT * \left[1 + \frac{1}{z + 4} \right] - \frac{34}{(z + 4)} + 6 \quad (12)$$

Donde:

MPT: Temperatura media del pavimento [°F].

MAT: Temperatura media del aire [°F].

z: Profundidad por debajo de la superficie del pavimento [pulgadas]

$$MPT = 68.9 * \left[1 + \frac{1}{2'' + 4} \right] - \frac{34}{(2'' + 4)} + 6$$

$$MPT = 80,71 \text{ } ^\circ F = 27 \text{ } ^\circ C$$

Por lo tanto, se toma para el análisis estructural una temperatura promedio de 27 °C.

5.2. Diseño de paquetes estructurales de pavimentos flexibles

5.2.1. Metodología de diseño

Link software BackViDE: <https://www.fceia.unr.edu.ar/laboratoriovial/descarga.php>

Se realiza un análisis estructural a partir del cual se determinan los espesores de cada capa. Para ello se emplea el software BackViDe – IMAE, en particular su componente “VIDA” (análisis en condiciones iniciales), el cual arroja el número de ciclos N que induce la falla de cada una de las capas del paquete estructural. A partir del menor valor de N, asociado con la capa que falla primero, y contando con el

número de ejes equivalentes anuales se puede obtener la cantidad de años de vida útil de la estructura. Se apunta a lograr una vida útil de 15 años para la estructura diseñada.

Internamente, BackViDe evalúa las tensiones y deformaciones en cada una de las capas que componen el paquete estructural y las coteja con las que resultan de las respectivas leyes de falla, obteniéndose el número de reiteraciones admisibles de la carga de referencia aplicada para esa capa. La vida útil del pavimento, queda pues definida por la capa que alcanza menor valor de repeticiones del eje equivalente. Los criterios de fallas para las capas ligadas son por fisuración por fatiga, y para las no ligadas por ahuellamiento,

Para el diseño estructural es necesario definir dentro del software las propiedades de las distintas mezclas y materiales a emplear. Para modelizar las curvas maestras de modulo dinámico de estas mezclas dentro del programa se introducen los datos de la Tabla 4.

Por otro lado, se define como criterio de falla por fatiga una superficie fisurada del 30% y, por ahuellamiento, una deformación permanente de 12 mm. El software considera que las capas ligadas fallarán por fatiga mientras que las no ligadas lo harán por ahuellamiento. Por ello, se deben definir las leyes de falla por fatiga de las distintas mezclas asfálticas a emplear.

Siguiendo con lo expuesto en el apartado 4.6 se toman como referencia los resultados de investigaciones anteriores. La ley de falla propuesta para las mezclas SBVS, SBVH, BVS y BVH se basa en la obtenida por Lastra-González et al [24] para polietilenos (PE) y la correspondiente a NFU deriva de la formulada por los mismos autores [24] para ELT (End – of – Life Tyres). A estas expresiones, obtenidas a partir de ensayos de laboratorio del tipo 4PBT, se les realiza un ajuste para adaptarlas a la condición in situ y finalmente introducirlas en el software. Para las demás mezclas, como se mencionó anteriormente, se emplean las leyes obtenidas por el Laboratorio Vial IMAE en estudios anteriores.

El software emplea la ecuación (13) para describir la ley de falla por fatiga de los materiales asfálticos, para el análisis en condiciones ideales:

$$N_{adm} = \left(\frac{\varepsilon_{t6}}{FTD} * \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{\alpha_{\varepsilon t}} * \left(\frac{3000}{E} \right)^{\alpha_E} * \left(\frac{\% asf}{10} \right)^{\alpha_{\% asf}} * Vr \quad (13)$$

Donde:

N_{adm} : Número de reiteraciones del esfuerzo ε_t admisibles en millones

ε_{t6} : Deformación específica de tracción para lograr un Nadm de un millón (10^{-6}), para una dada condición de fisuración en superficie.

FTD: Factor Top Down, que minorra las solicitaciones admisibles en el caso que estas se produzcan en la superficie de la calzada, considerando la diferencia del estado tensional.

ϵ_t : Deformación específica de tracción en micro deformaciones (10^{-6})

E: Módulo de la mezcla asfáltica (MPa)

$\alpha_{\epsilon t}$: Coeficiente que proporciona la susceptibilidad con el nivel de deformaciones

α_E : Coeficiente que proporciona la susceptibilidad con el módulo

$\% asf$: Porcentaje de asfalto en volumen.

$\alpha_{\% asf}$: Coeficiente que proporciona la susceptibilidad con el porcentaje de asfalto

Vr: Vida remanente contemplando los casos con daño acumulado previo al período de análisis. (Material sin daño declarar 100 en porcentaje de vida remanente o daño cero)

Para las mezclas en estudio, se definen los valores enunciados en la Tabla 12. Estos dan lugar a las gráficas de la Figura 17.

Tabla 12 - Parámetros de leyes de falla por fatiga

Nº	Denominación	ϵt_6 [10^{-6}]	FTD	Alfa ϵt	Alfa mod	% Asf [% Vol]	Alfa % Asf	Vr [%]	E (27°- 10Hz) [Mpa]
1	CAC CA20 SBVS	256,00	1,00	4,70	2,70	11,63	3,50	1,00	4950
2	CAC CA20 SBVH	256,00	1,00	4,70	2,70	12,24	3,50	1,00	4820
3	CAC CA20 BVS	256,00	1,00	4,70	2,70	11,50	3,50	1,00	5380
4	CAC CA20 BVH	256,00	1,00	4,70	2,70	12,13	3,50	1,00	6530
5	CAC CA20 3M	256,00	1,00	5,70	2,70	11,00	3,50	1,00	6720
6	CAC CA20 NFU	256,00	1,00	5,70	2,70	11,50	3,50	1,00	4150
7	ECSE MTE	213,00	1,00	4,30	2,70	12,14	3,50	1,00	2300
8	CAC D19 CA30	213,00	1,00	4,30	2,70	12,07	3,50	1,00	3020
9	CAC D19 AM3	256,00	1,00	5,70	2,70	11,56	3,50	1,00	3950
10	CAC D19 AAMP	256,00	1,00	7,60	2,70	10,63	3,50	1,00	4650

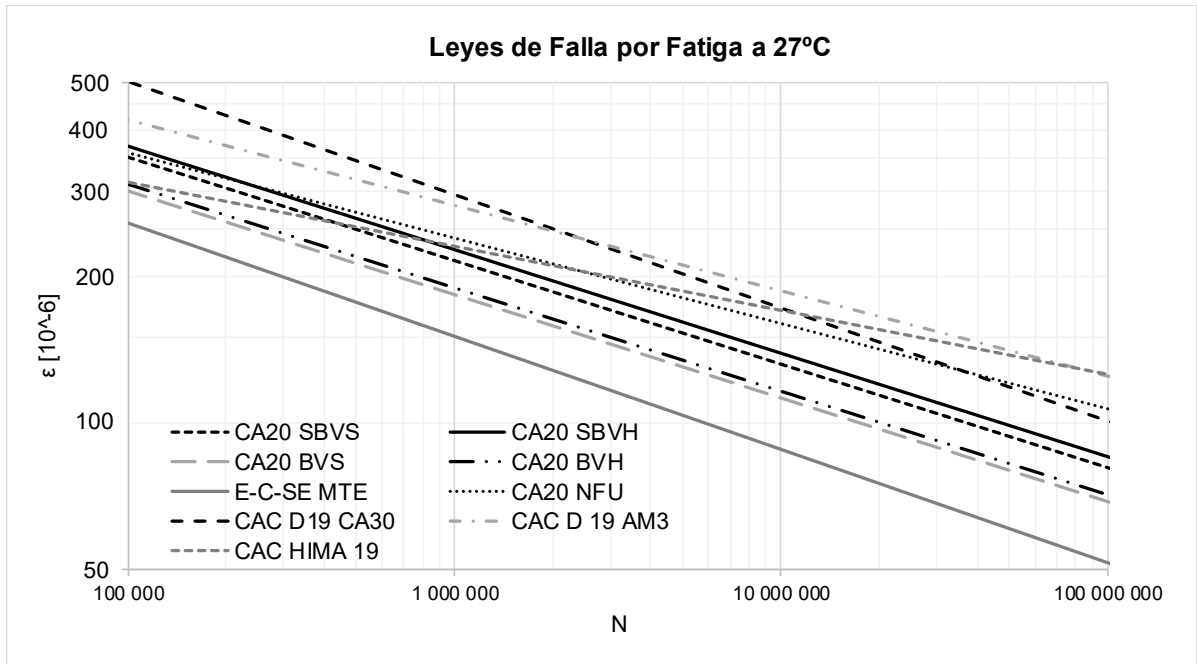


Figura 17 - Leyes de falla por fatiga (calibradas)

5.2.2. Dimensionamiento de las estructuras analizadas

Se definen distintos tipos de pavimentos flexibles estructuralmente equivalentes diseñados para una vida útil de 15 años. Todos ellos tendrán la misma base, sub-base y carpeta asfáltica y sólo se diferenciarán por el material y el espesor de la capa de base asfáltica.

Esquema estructural genérico:



Figura 18 - Esquema estructural

La estructura patrón se muestra en la Figura 19. Se modela la misma en el software y se realizan los diferentes análisis estructurales, cada uno de ellos con un material de base asfáltica diverso. A partir de los mismos, se definen los espesores necesarios de base asfáltica para arribar a la vida útil de diseño.

El comportamiento que el programa considera para los materiales tipo suelos y materiales granulares no ligados definidos como “Mr (CBR XXX)” se basa en la variación del módulo resiliente Mr según el estado de tensiones que se tenga en un cierto punto. El software subdivide automáticamente las capas de material granular en subcapas de espesores más delgados con el fin de que los valores de Mr calculados sean más representativos.

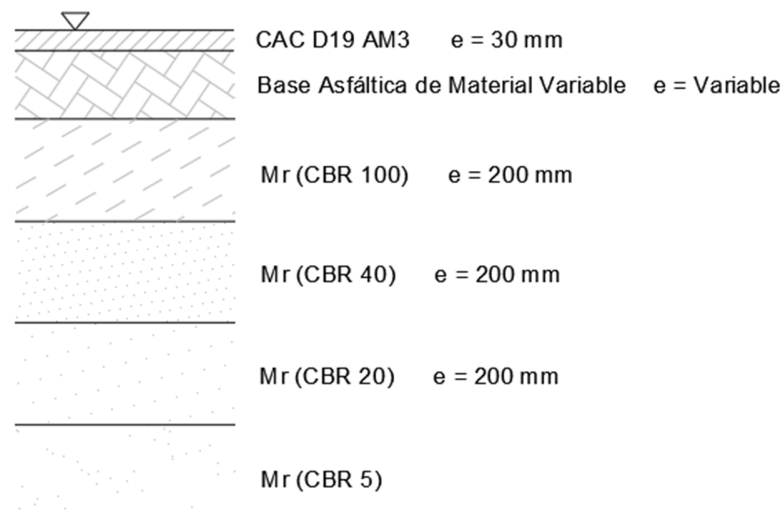


Figura 19 - Esquema estructural patrón

Luego de procesadas las diferentes estructuras mediante el software BackViDe se arriba a los resultados expuestos en la Tabla 13 y Figura 10, los cuales indican los espesores de base asfáltica asociados a una vida útil de la estructura de 15 años.

La vida útil de la estructura se expresa en función del número de ejes equivalentes de 80 kN admisible (Nadm), el cual indica la cantidad de ciclos de carga que conduce a la falla. Este valor debe ser mayor o aproximadamente igual al valor de ESALs calculado en 5.1.1. Información más exhaustiva de los resultados se puede encontrar en el Anexo 1.

Tabla 13 - Resultados del análisis estructural

Material Base Asfáltica		E* (27°C – 10 Hz) [MPa]	Espesor [mm]	ϵ_t [10^{-6}]	Nadm	Nadm/ESALs
1	CAC CA20 SBVS	4950	140	-127	16 676 374	1,12
2	CAC CA20 SBVH	4820	130	-138	14 500 944	0,97
3	CAC CA20 BVS	5380	140	-122	16 062 044	1,08
4	CAC CA20 BVH	6530	140	-109	19 144 426	1,28
5	CAC CA20 3M	6720	150	-100	17 279 832	1,16
6	CAC CA20 NFU	4150	130	-150	18 979 966	1,27
7	ECSE MTE	2300	160	-171	15 063 289	1,01
8	CAC D19 CA30	3020	170	-139	15 501 593	1,04
9	CAC D19 AM3	6720	150	-100	17 283 522	1,16
10	CAC D19 AAMP	4650	110	-161	16 675 577	1,12

En todos los casos, el paquete estructural llega a la falla debido a la fisuración por fatiga de la base asfáltica. Esta información se incluye en el Anexo 1. En la se muestra un gráfico comparativo de los espesores obtenidos para cada base asfáltica.

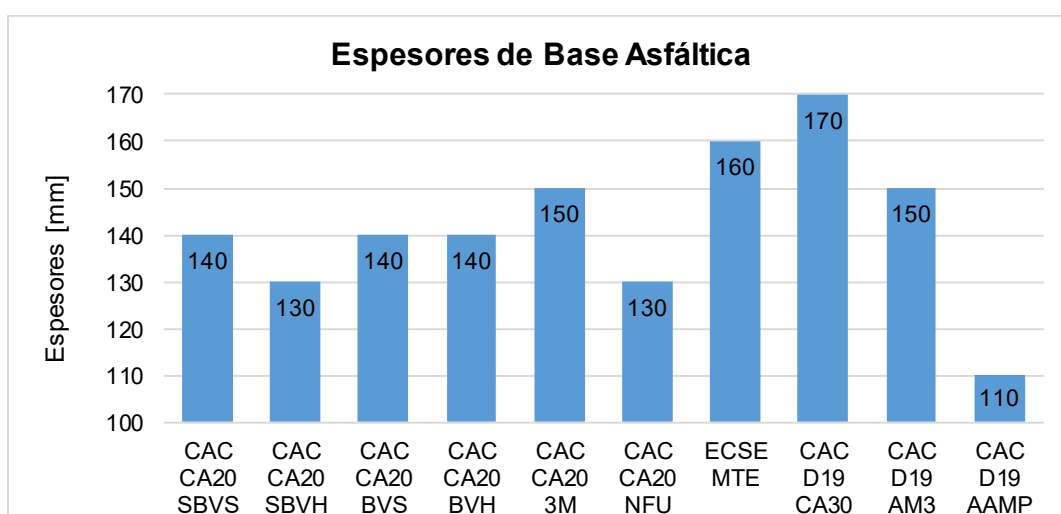


Figura 20 - Espesores de bases asfálticas con materiales diversos.

En base a los resultados obtenidos se puede destacar una reducción de espesores del 20% para las mezclas con materiales reciclados, ya sea caucho o plástico, respecto al obtenido para la mezcla convencional de control CAC CA30. Se observa también para estas mezclas un comportamiento similar al del asfalto modificado con polímeros (AM3) dado que, al incorporarse los residuos en la mezcla a altas temperaturas, los polímeros se combinan total o parcialmente con el ligante ya sea la incorporación de los mismos realizada por vía seca o húmeda.

Por otro lado, la mezcla templada con emulsión asfáltica MTE consigue una reducción de espesores del 5% respecto a la mezcla de control.

La mezcla con plástico micronizado 3M tiene una elevada rigidez y no resiste bien a fatiga, que es el tipo de falla que considera el software para capas ligadas. Por ello, solo se logra para esta mezcla una reducción de espesores del 10%.

Finalmente, se observa que la mezcla de alto módulo AAMP es la que ofrece mejores resultados, con reducciones de espesores de hasta 35%.

Se concluye en esta instancia que la reducción de espesores es un aspecto positivo en términos ambientales porque conlleva a una reducción del uso de materiales vírgenes y otros recursos, en particular asociados a las etapas de transporte y construcción.

6. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

6.1. Teoría del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV), también conocido por su nombre en inglés Life Cycle Assessment (LCA), es una herramienta que permite evaluar los impactos ambientales generados durante el “ciclo de vida” (Figura 21) de un producto o servicio, es decir, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, transporte, utilización, tratamiento final y reciclado, hasta su disposición final. Se trata de una metodología estandarizada por las normas ISO 14040 y 14044 [28][29].



Figura 21 - Ciclo de vida de un producto o servicio. Fuente: elaboración propia.

Además de evaluar el impacto ambiental, esta metodología permite:

- Detectar procesos o etapas dentro del ciclo de vida de un producto cuyo desempeño ambiental pueda mejorarse.
- Diseñar y rediseñar de manera iterativa procesos o etapas del ciclo de vida de manera de arribar a la alternativa menos perjudicial para el ambiente.
- Asistir a la toma de decisiones a los fines de lograr una planificación estratégica, favoreciendo la reducción de impacto ambiental en el diseño de un producto o proceso o rediseño de los mismos.
- Elegir entre distintos productos o tecnologías que cumplan una misma función, privilegiando al menos nocivo para el ambiente.
- Seleccionar los indicadores más pertinentes de desempeño ambiental, incluyendo las técnicas de medición asociadas.
- Proporcionar valores de impacto ambiental que puedan aplicarse a estrategias de Marketing.

El ACV de un producto o servicio consiste, a grandes rasgos, en definir una serie de procesos que transforman las entradas (materias primas, energía) en salidas (producto elaborado, sub-productos, desechos) y para cada uno de estos procesos determinar las emisiones o contaminantes que se generan, a fin de arribar a un valor de impacto ambiental producido durante el ciclo de vida. Esto se esquematiza en la Figura 22 y la Figura 23.

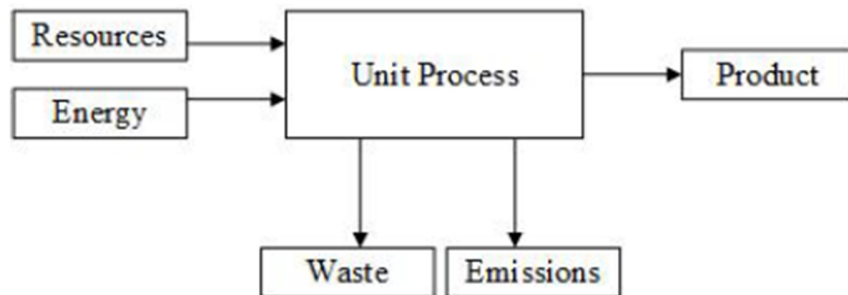


Figura 22 – Descripción de entradas y salidas de un proceso. Fuente: University of California Pavement Research Center [30]

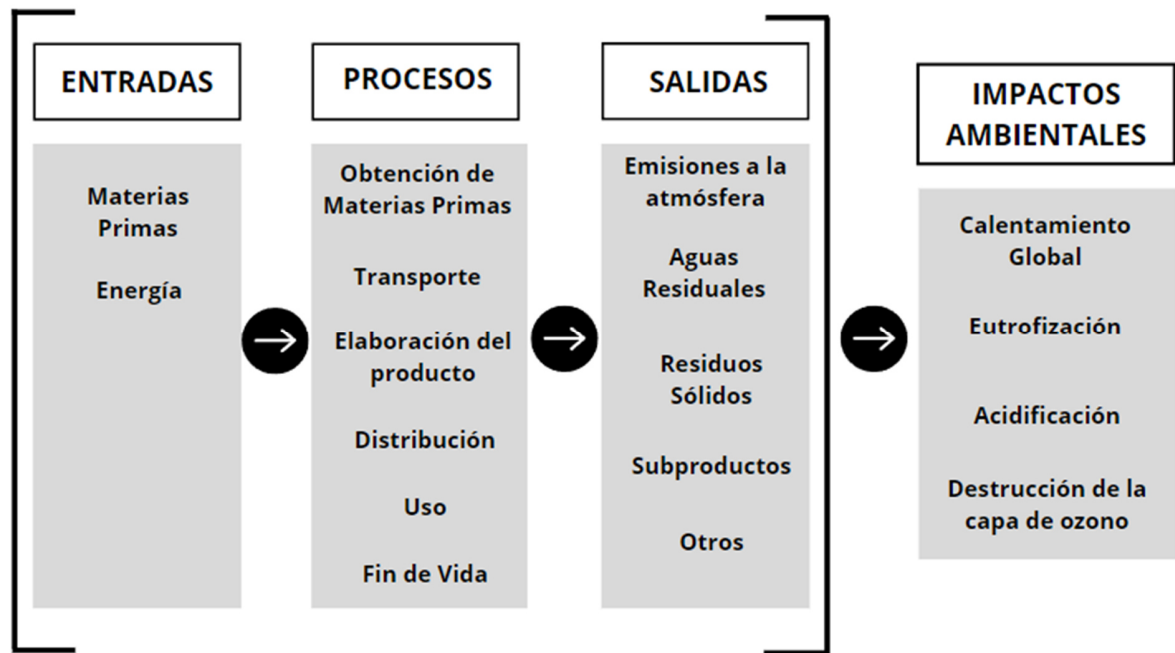


Figura 23 - Esquema proceso ACV. Fuente: elaboración propia.

Como se indica en la Figura 23, los procesos pueden incluir desde la obtención de materias primas hasta el fin de la vida útil, pasando por transporte, producción y uso. Es posible considerar sólo algunas de ellas, o bien todas o incluso considerar una etapa posterior de reciclado. Esto da lugar a las clasificaciones, llamadas “límites del sistema”, que se le puede dar al ACV. Las mismas se encuentran ilustradas en la Figura 24 para el caso de un pavimento asfáltico y se detallan a continuación:

- **Modelo de la cuna a la tumba:** desde la extracción de materias primas, transporte, elaboración/producción y uso, hasta el tratamiento de residuos después de que el producto ya no es utilizable. Sirve para comparar los impactos ambientales que se producen durante todo el tiempo de vida de aquellos productos que cumplan la misma función y que ofrezcan el mismo beneficio.
- **Modelo de la cuna a la puerta:** desde la extracción de materias primas hasta el producto terminado y finaliza en el momento en que sale de la planta de producción. Sirve para determinar los potenciales impactos ambientales en procesos de producción alternativos de un producto, sin considerar los impactos ambientales provenientes de la utilización y de fin de vida del producto.
- **Modelo de la puerta a la puerta:** analiza los procesos de producción de un producto únicamente.

- **Modelo de la cuna a la cuna:** desde la extracción de materias primas, pasando por la producción, el transporte y el uso, hasta que el producto ingresa nuevamente al sistema como entrada luego del final de su vida útil en el sistema original. Sirve para el análisis de los productos que son reciclables en su mayor parte. El modelo presenta una forma cíclica donde se vincula la fase de fin de vida útil con la fase de producción inicial.

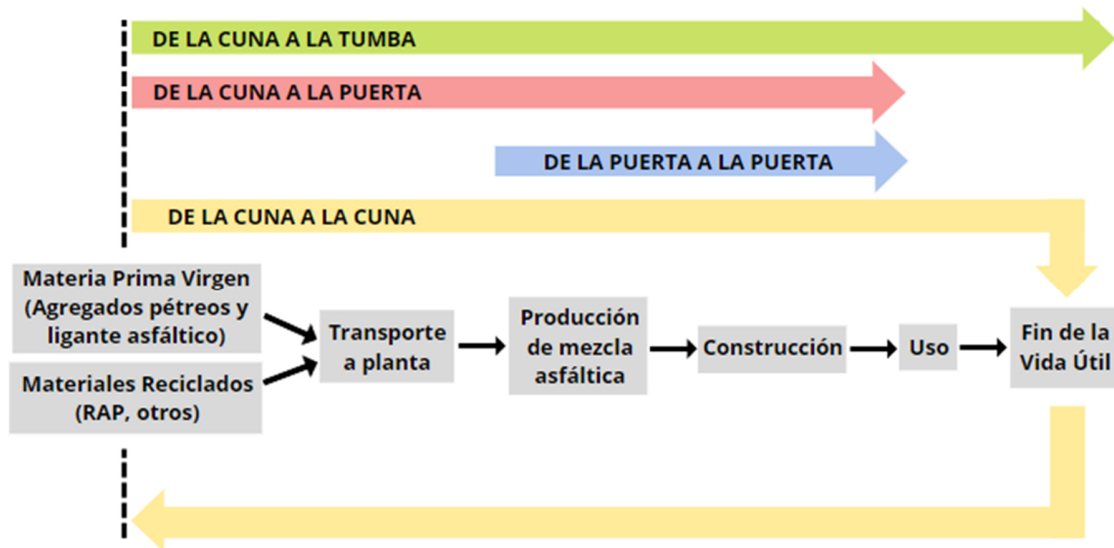


Figura 24 - Límites del Sistema. Fuente: elaboración propia.

La normativa internacional que actualmente regula y estandariza los ACV fue desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) en sus versiones 14040 y 14044. La norma ISO 14040 se refiere a los principios y marco de referencia del ACV, y la ISO 14044 se refiere a los requisitos y las directrices (metodología) para elaborar el ACV [28][29]. Estas son las normativas que se consideran en el presente estudio.

Según lo definido en la norma ISO 14040, un ACV consta de cuatro etapas y responde al esquema de la Figura 25.

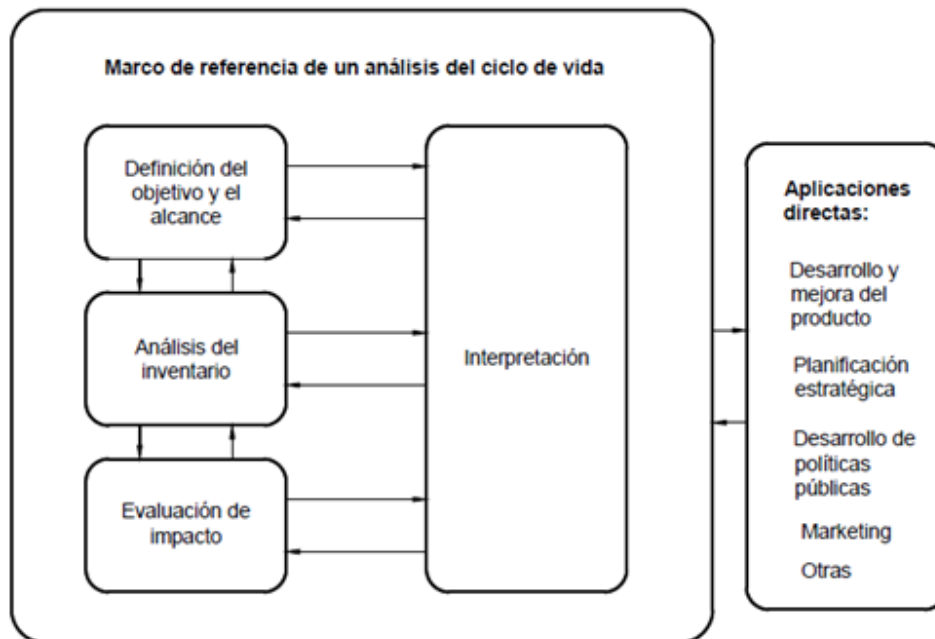


Figura 25 – Esquema de las etapas de un ACV según norma ISO 14040

1) Definición del objetivo y alcance.

- Especificar la aplicación prevista, es decir, para qué se va a realizar el ACV y a quién está destinado (audiencia).
- Identificar las razones que llevan a su realización y establecer el contexto en el cual va a desarrollarse.
- Indicar si se va a realizar un estudio comparativo y si se pretende su divulgación.
- Definir la unidad funcional considerada, es decir, la unidad de medida que define al producto o servicio en función de la cual se van a expresar los impactos.
- Definir los límites del sistema, es decir, qué aspectos, etapas o procesos van a ser considerados y el nivel de detalle que se pretende.
- Establecer la metodología de cálculo a emplear para realizar el ACV. Además, corresponde indicar el tipo de datos a emplear y los requisitos de calidad de los mismos, las hipótesis utilizadas y las comparaciones de diversos sistemas a realizar, entre otros.

2) Inventario del Ciclo de Vida (LCI – Life Cycle Inventory Analysis).

- Recopilación de todos los consumos de energía, materiales y recursos que entran al sistema bajo estudio, y de todas las salidas de emisiones, productos y residuos que salen del sistema bajo estudio a lo largo de todo el ciclo de vida.

3) Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (LCIA – Life Cycle Impact Assessment).

- Asignación de las “salidas” definidas en la etapa de inventario a diferentes **categorías de impacto**. Cada categoría de impacto se corresponde con un cierto tipo de impacto ambiental y posee una unidad que la define, llamada **indicador de categoría**. Ejemplos de cada uno se incorporan en la Tabla 14.
- Definición de **modelos de caracterización**. Los mismos se encargan de recolectar las “salidas” del LCI, determinar a qué categoría de impacto contribuyen, calcular la magnitud de esa contribución y transformar todas las unidades involucradas al indicador de categoría a través de **factores de caracterización**. La Figura 26 esquematiza el procedimiento. Existen diversos modelos de caracterización, por ejemplo el que se muestra en la Figura 27.
- Conocer y evaluar la magnitud y cuán significativos son los potenciales impactos ambientales generados a lo largo del ciclo de vida de un producto o servicio. Esto se manifiesta en los resultados de los indicadores de categoría.

Tabla 14 – Ejemplos de categorías de impacto e indicadores de categoría

Categoría de Impacto	Algunas especies contribuyentes (salidas LCI)	Indicador de Categoría
Calentamiento Global	CO ₂ N ₂ O CH ₄	kg CO ₂ eq (100 años)
Acidificación	SO ₂ NO _x NH ₃	Kg SO ₂ eq
Agotamiento de minerales	Agregados pétreos, bitumen	Ton de minerales
Agotamiento de combustibles fósiles	Energía	Ton eq de combustible
Agotamiento de ozono estratosférico	CFC ₁₁	Kg CFC ₁₁ eq
Eutrofización	NO _x NH ₃ Fosfatos	Kg PO ₄ eq
Agotamiento de rellenos sanitarios	Desechos Sólidos	m ³ de relleno sanitario

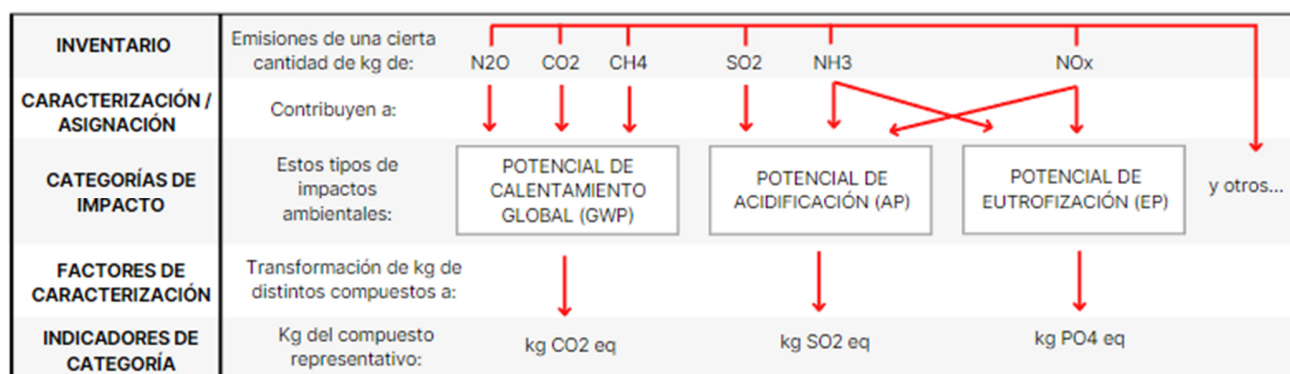


Figura 26 - Esquematización de LCI y LCIA. Fuente: elaboración propia.

Resource	Characterization Factors
Global warming potential (GWP)	
CH ₄	62
CO ₂	1
CO	1.57
N ₂ O	275
Acidification potential (AP)	
NO _x	0.7
SO _x	1
NH ₃	1.88
Eutrophication potential (EP)	
NO _x	0.13
NH ₃	0.33
COD	0.022
Photochemical ozone creation potential (POCP)	
CH ₄	0.007
Benzene	0.189
Ethene	1
Hydrocarbons, unspecified	0.398
Propene	1.03
Toluene	0.563

Figura 27 – Ejemplo de modelo de caracterización. Fuente: Cabaraban et Al [31].

4) Interpretación del Ciclo de Vida.

Consiste en la etapa final del ACV, en la cual se realiza un análisis de los resultados obtenidos y se retroalimenta el sistema. Algunas de las tareas a realizar en esta instancia son:

- Evaluación de los hallazgos del análisis del inventario o de la evaluación del impacto, o de ambos, en relación al objetivo y al alcance definidos.
- Elaboración de conclusiones y recomendaciones.
- Análisis de sensibilidad.
- Revisión crítica mediante la cual revisores examinan las suposiciones adoptadas, los datos que las complementan y su integridad metodológica.

A nivel nacional, en Argentina, datos suministrados por el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) indican que son de aplicación las siguientes normas en materia medioambiental:

- Leyes de Cambio Climático - Ley 24295, Ley 25438, Ley 25675 LGA (Apruébase la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático).

- Ley General del Ambiente - Ley N° 25.675 (Aquí están enmarcadas regulaciones sobre Impacto Ambiental y Social, e Instrumentos Ambientales).
- Resoluciones de Producción Limpia y Consumo Sustentable - Resolución 1139/2008
- Decretos de Seguro Ambiental - Decreto 1638/2012.
- Programa nacional de emprendedores para el desarrollo sustentable (PROESUS)
- Consejo Nacional de Bioeconomía (junio, agosto 2017)
- Plan Nacional de Respuesta al Cambio Climático - puesta en marcha entre el 2018-2019
- Ley Nacional 26899 y MINCYT - Repositorios digitales institucionales de acceso abierto.

Por su parte, el INTA comenzó hace unos años a desarrollar el uso del ACV y a aprender a utilizarlo como herramienta en los sectores agropecuario y agroindustrial. Respecto al ámbito de la construcción, existe únicamente reglamentación relativa a las viviendas [32].

6.2. Marco de referencia para ACV: parámetros, hipótesis y consideraciones.

El ACV puede ser aplicado para cuantificar los impactos ambientales de los pavimentos flexibles a lo largo de todas las etapas de su vida y ha sido utilizado por distintos investigadores con diversos enfoques y consideraciones. La Tabla 15 y la Tabla 16 muestran la información recopilada sobre los ACV llevados a cabo por diversos autores, donde los impactos ambientales se expresan en términos de potencial de calentamiento global (GWP).

Tabla 15 – Revisión Bibliográfica: ACV realizados por diversos autores (Parte 1)

N° ref bibliográfica	[33]	[34]	[35]	[36]	[37]	[38]	[39]
Autores	Temren, Z et Al	Gschosser, F.	G. van Bochove et Al	Cahuapé Casaux, M	Mukherjee, A.	Riekstins, A. et Al	Oreto, C. et Al.
País	Turquía	Suiza	Holanda	Argentina	EEUU	Letonia	Italia
Año	2012	2011	2012	2015	2016	2022	2021
Fases	Materiales	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Construcción	-	✓	✓	✓	✓	✓
	Uso	-	-	-	-	-	-
	Mantenimiento	-	-	-	-	-	-
	Fin de vida	-	-	-	-	-	-
Software	asPECT	SimaPro	s/d	SimaPro	OpenLCA	LCA_Pave	SimaPro
Inventario	asPECT	Ecoinvent	s/d	Ecoinvent	Primary Data	LCA_Pave	Primary Data
Unidad Funcional	1 ton	1 pavimento	1 ton	1 km	1 short ton	1 km	1 km
Categoría de impacto	GWP	GWP	GWP	GWP	GWP	GWP	GWP
Indicador de categoría	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq
Tipo de mezcla	Convencional	Convencional	Convencional	Con Polímeros	Covencional	Varios	Covencional
Resultado [kgCO2eq/ton mezcla]	30,0	43,0	58,4	43,7	53,2	46,1	91,7

Tabla 16 - Revisión Bibliográfica: ACV realizados por diversos autores (Parte 2)

Nº ref bibliográfica	[40]	[41]	[42]	[43]	[44]	[45]
Autores	Milachowski, C. et Al	García Caseros, A.	Mazumder, M. et Al	Hui Ma et Al.	Sánchez Navarro, L.	Capuano, L. et Al
País	Alemania	España	EEUU	China	México	Italia
Año	2011	2014	2016	2016	2018	2021
Fases	Material	✓	✓	✓	✓	✓
	Construcción	✓	✓	✓	✓	✓
	Uso	-	-	-	-	-
	Mantenimiento	✓	✓	✓	✓	✓
	Fin de vida	-	-	-	✓	✓
Software	SimaPro	s/d	s/d	OpenLCA	SimaPro	OpenLCA
Inventario	Ecoinvent	s/d	s/d	Ecoinvent	Primary Data	Ecoinvent
Unidad Funcional	1 km	1 km	1 km	1 km	1 pavimento	1 km
Categoría de impacto	GWP	GWP	GWP	GWP	GWP	GWP
Indicador de categoría	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq
Tipo de mezcla	SMA	Convencional	Convencional	Covencional	Covencional	Covencional
Resultado [kgCO2eq/ton mezcla]	137,5	86,6	78,7	52,6	197,0	200,0

En general, la mayoría de los autores considera las etapas de extracción/elaboración de materia prima, producción de mezclas, construcción del camino y mantenimiento. Se observa que los resultados son más similares cuando se consideran únicamente las etapas de producción de materiales y construcción del camino. Cuando se tiene en cuenta la etapa de mantenimiento, los números presentan mayor variabilidad debido a las diversas estrategias de rehabilitación consideradas. En general, la etapa de uso no se evalúa dado que la mayor parte de la bibliografía trata sobre estudios comparativos y la operación se considera idéntica en todos los casos. Otras fuentes de variabilidad importante la constituyen, por un lado, las distancias de transporte consideradas, y por el otro, las bases de datos y el software empleado.

Por su parte, Sánchez Navarro [44] realizó una revisión bibliográfica de 47 autores para conocer las etapas mayormente evaluadas y las categorías de impacto consideradas, arribando a los resultados de la Figura 28 y la Figura 29.

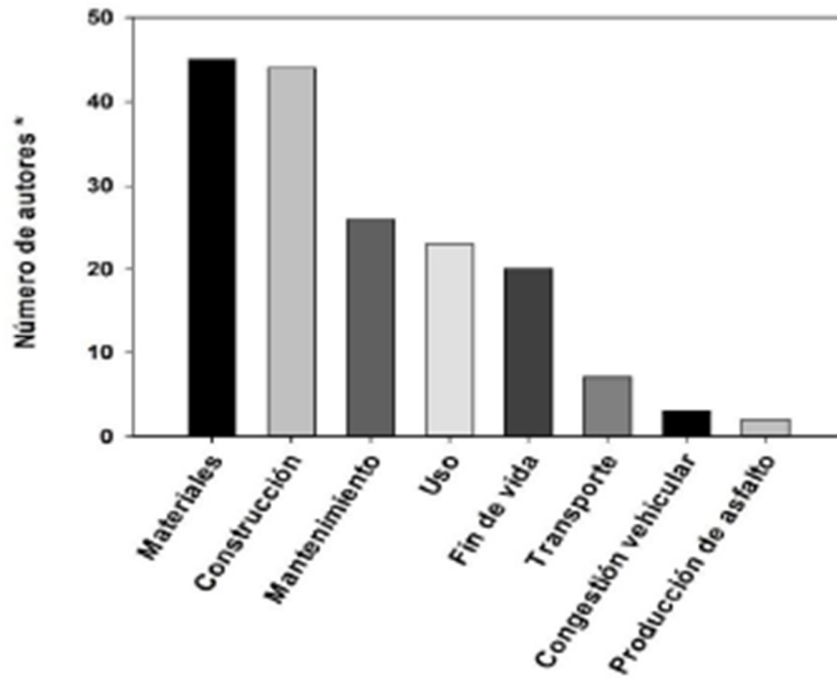


Figura 28 – Etapas del ciclo de vida de un pavimento consideradas por distintos autores. Fuente: Sánchez Navarro [44]

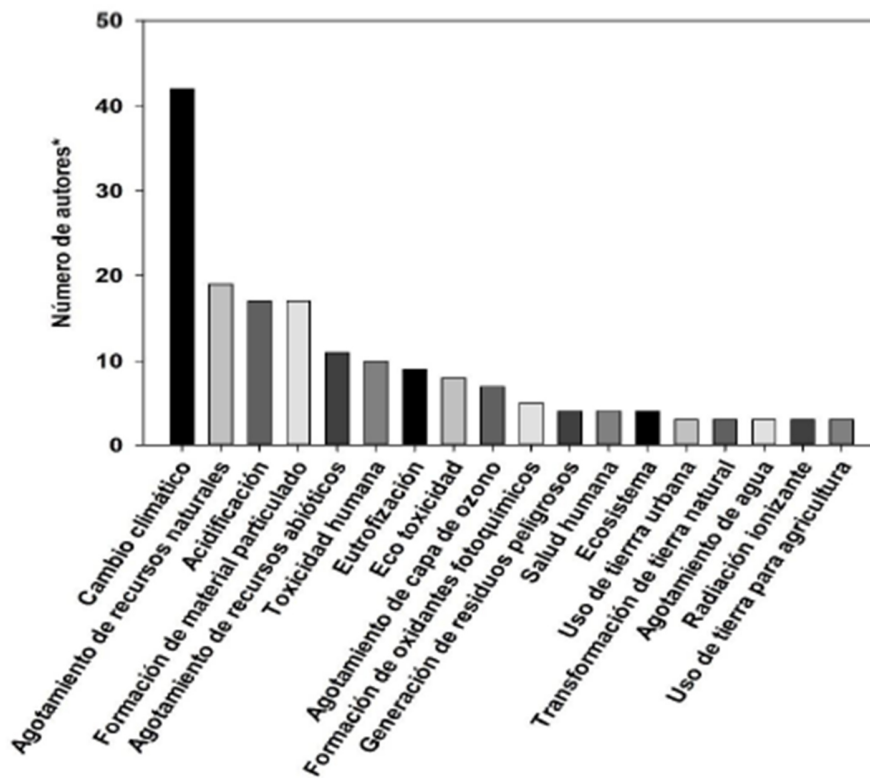


Figura 29 – Categorías de impacto consideradas por distintos autores. Fuente: Sánchez Navarro [44]

Se concluye que las consideraciones más frecuentes son:

- Unidad funcional: 1 km
- Categoría de impacto: Potencial de Calentamiento Global (GWP)
- Indicador de categoría: kg CO₂ eq.
- Límites del sistema: de la cuna a la puerta

Se prevé la adopción de estas consideraciones en el presente trabajo, por lo que el objetivo del ACV consiste en determinar los potenciales impactos ambientales de calentamiento global (en inglés: Global Warming Potential GWP) generados por la elaboración y colocación en obra de una capa de mezcla asfáltica (base asfáltica). Se lleva a cabo un ACV para cada una de las bases asfálticas de la Tabla 13, las cuales incorporan las mezclas descritas en el apartado 4. Se trata de un estudio comparativo en el que se evalúa el GWP producido por la elaboración y colocación de cada una de las bases asfálticas descritas. No se incluye en el estudio el resto del paquete estructural de pavimento dado que es idéntico en todos los casos. Tampoco se considera la etapa de uso de las estructuras dado que han sido diseñadas para la misma vida útil de 15 años, lo cual da lugar a un enfoque “de la cuna a la puerta”. Debido a esto, no se incluyen en el análisis las actividades de mantenimiento dado que las mismas se desarrollarían durante la vida útil de la estructura.

Se pretende, a partir de los resultados del ACV, identificar las ventajas y desventajas ambientales de los diferentes tipos de mezcla estudiados y determinar cuál de ellas es la menos nociva para el ambiente. Con este ACV, además, se busca conocer cuan beneficioso es para el medio ambiente incorporar residuos como plástico o caucho en las mezclas o incluso producir mezclas asfálticas a menor temperatura de manera de contar con valores que den lugar a estrategias de marketing destinadas al empleo de estas mezclas en el territorio nacional y a la consiguiente reducción de materiales susceptibles de ser dispuestos en rellenos sanitarios o vertederos. Además, sirve internamente al Laboratorio Vial IMAE para rediseñar las mezclas propuestas optimizando los atributos ambientales de las mismas, y también para interiorizarse en los procedimientos del ACV.

A continuación, se resumen las condiciones establecidas para el desarrollo del ACV:

- **Unidad Funcional:** 1 km de base asfáltica (espesor obtenido en 5.2.2) de ancho 3,65 m (1 carril).
- **Límites del sistema:** de la cuna a la puerta
- **Categoría de impacto:** calentamiento global (en inglés: Global Warming Potential GWP)
- **Indicador de categoría:** kg CO₂ eq
- **LCI y LCIA:** en función del software que se elija.
- **Cut-off rule:** incidencia < 1% (masa o energía)

En la Figura 30 se esquematizan los límites del sistema considerados para el presente ACV. Las etapas y procesos que se consideran son:

- **ETAPA N°1: Elaboración de Materias Primas**

Considera todos los procesos necesarios para la obtención de materias primas (ligante asfáltico y áridos) para la elaboración de mezcla asfáltica. Con respecto a los materiales reciclados, en esta instancia se incluye la separación, acondicionamiento y procesamiento de los residuos para poder incorporarlos dentro de las mezclas asfálticas.

- **ETAPA N°2: Transporte a planta**

Tiene en cuenta el transporte de cada material individual desde el sitio de producción del mismo hasta la ubicación de la planta elaboradora de mezcla asfáltica. Se consideran distancias promedio para la zona de la ciudad de Rosario, Argentina. El transporte se realiza por tierra mediante camiones.

- **ETAPA N°3: Producción de Mezcla Asfáltica**

Considera el proceso de producción de concreto asfáltico en la planta elaboradora de mezclas. Únicamente se tienen en cuenta los impactos ambientales generados por la operación de la planta.

- **ETAPA N°4: Transporte desde planta a obra**

Tiene en cuenta el transporte de la mezcla asfáltica desde el sitio de producción de la misma (planta asfáltica) hasta la obra (zona de colocación de la mezcla). Se consideran distancias promedio para la zona de la ciudad de Rosario, Argentina. El transporte se realiza por tierra mediante camiones.

- **ETAPA N°5: Construcción**

Considera el proceso constructivo de 1 km de base asfáltica. Los equipos a emplear son: terminadora, rodillo neumático y compactador vibratorio.

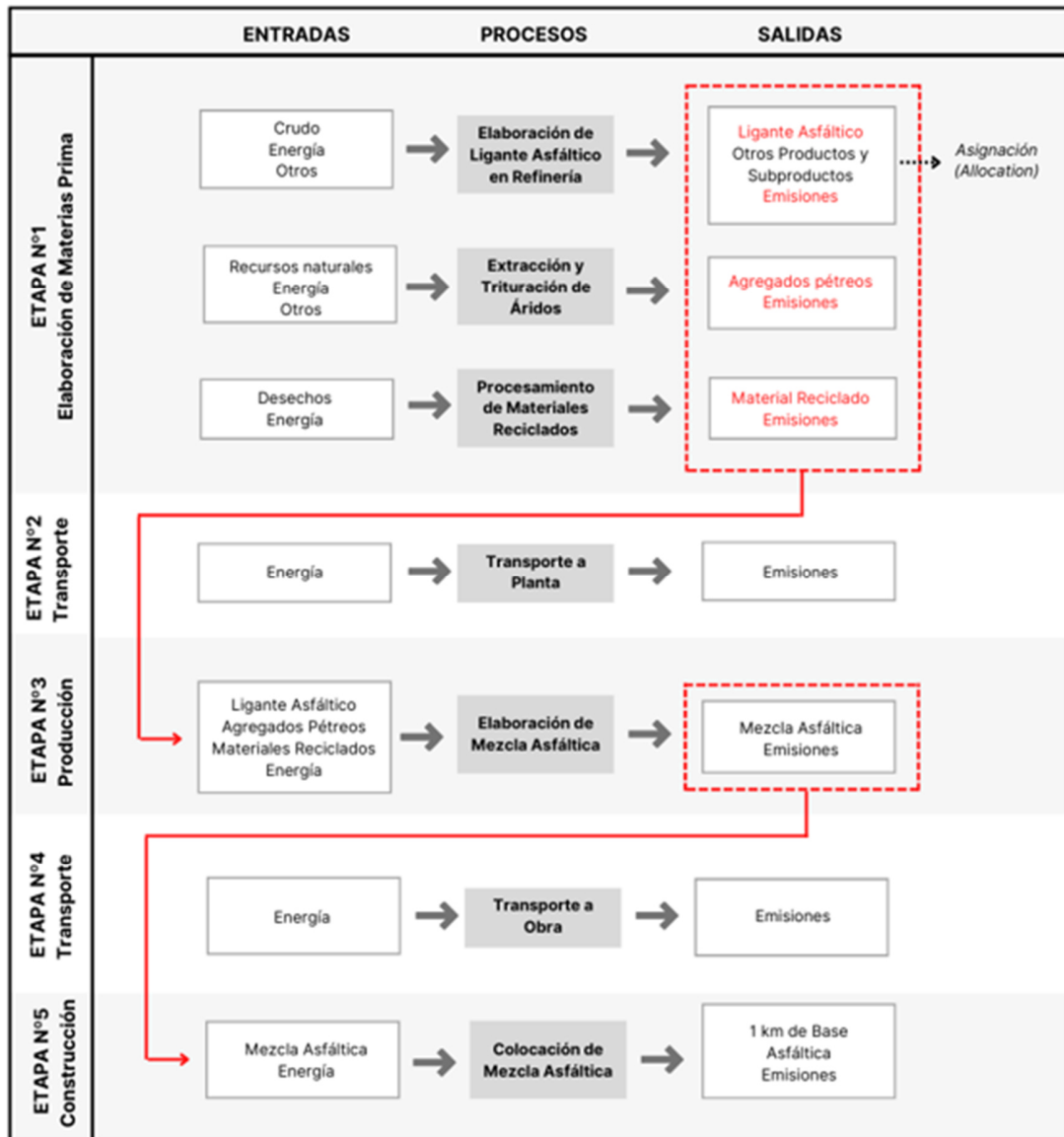


Figura 30 – Límites del Sistema para el presente ACV. Fuente: Elaboración Propia

6.3. Selección de software de cálculo ACV

Existen diferentes herramientas informáticas que facilitan la realización de un Análisis de Ciclo de Vida. Dos de los softwares más utilizados actualmente son SimaPro y GaBi y ambos son de pago. Por un lado, SimaPro incorpora las bases de datos más importantes, como Ecoinvent, ILCD, Agri-footprint, etc. Además permite crear bases de datos propias y utilizar las metodologías de evaluación de impacto más importantes y actualizadas, como: ILCD 2011 Midpoint+, CML – IA baseline, ReCiPe 2016, IPCC 2013 y TRACI 2.1 [46]. Por otro lado, GaBi incorpora una base de datos propia del software, que es hoy una de las mayores bases de datos de ACV en el mercado. Incluye también otras bases de datos muy

importantes para ACV como Ecoinvent, ILCD-ELCD, US LCI, etc. y utiliza las mismas metodologías de evaluación de impacto que SimaPro [47].

Una alternativa a los softwares comerciales la constituyen los softwares libres. Entre ellos, el más conocido es OpenLCA (software gratuito y de código abierto). El mismo permite la utilización de bases de datos gratuitas (NEEDS, USDA, Environmental Footprints, Agribalyse, etc.) o bien de pago (Ecoinvent, GaBi) y propone una metodología de evaluación de impacto propia del programa, pero también admite el uso de otras. Otros softwares libres son PaLATE y el desarrollado por la US Federal Highway Administration llamado LCA_Pave. A diferencia de los mencionados anteriormente, estos están orientados específicamente a los ACV de pavimentos.

João Santos et al [48] realizan una comparación de diversos softwares orientados al análisis de ACV de pavimentos y arriban a la conclusión de que existe una variación considerable en los resultados del ACV en función de qué software se utilice. Sin embargo, sostienen que los impactos generados por los materiales y procesos más comunes son menos sensibles a la selección de software mientras que para materiales no convencionales muchas veces ni siquiera se tiene base de datos.

Partiendo de esta información, se concluye que el software a seleccionar para el presente trabajo debe ser tal que permita comparar las diferentes estructuras realizadas, para lo cual deberá contar con una base de datos que permita modelizar las mezclas no convencionales y “premiar” el empleo de materiales reciclados. A su vez, se busca utilizar inventarios y métodos de evaluación de impactos libres de la mayor confianza posible y aplicables en Argentina. Al no contar con inventarios ni bases de datos de Argentina, se recae en el empleo de datos provenientes de otros países. Esto conlleva a que el valor absoluto de impacto ambiental no sea representativo de lo que sucede en el país, pero los valores que surjan del análisis comparativo sí tendrán validez dado que todas las soluciones son comparadas sobre la misma base.

6.3.1. OpenLCA

(2006) - <https://www.openlca.org/>

OpenLCA es una herramienta para la realización de ACV de tipo libre y gratuita. Permite también la realización de modelos económicos. Se trata de un software de código abierto lanzado por la compañía alemana GreenDelta que se viene desarrollando desde 2006. Permite el uso de cualquier base de datos o metodología LCIA (de pago o gratuitas). La plataforma OpenLCA Nexus, disponible online, cuenta con inventarios, bases de datos y recursos de descarga gratuita correspondientes a una amplia gama de sectores productivos. OpenLCA es también compatible con muchas otras plataformas utilizadas en el mercado permitiendo el pasaje de información entre ellas.



Figura 31 - Logo del Software OpenLCA [49]

Para comenzar a utilizar el software es necesario contar con una base de datos, la cual puede ser importada desde un archivo existente o creada por el usuario. La Figura 32 muestra una captura de pantalla de una base de datos existente importada en OpenLCA. Las bases de datos cuentan con:

- **Procesos (Processes)**: Producción o modificación de productos o materiales. Transforma las entradas en salidas. Son de tipo unitarios.
- **Flujos (Flows)**: Elementos que constituyen las entradas y salidas de un proceso (materias primas, energía, productos elaborados, emisiones, desechos, etc.). Son cuantificables.
- **Sistema de producto (Product System)**: Conjunto de procesos unitarios que da lugar al ciclo de vida de un producto. Está caracterizado por la unidad funcional del ACV y presenta un diagrama con los límites del sistema (Figura 33).
- **Proyectos (Projects)**: Agrupa diversos sistemas de productos con el objetivo de realizar un estudio comparativo, entre otras funciones. Permite la elección de metodología LCIA y categorías de impacto a evaluar.
- **Indicadores y parámetros (Indicators and Parameters)**: Incluye una lista de las metodologías LCIA y los sistemas de control de calidad de datos disponibles para emplear en el estudio.
- **Información antecedente (Background Data)**: Incluye información relativa a las unidades de masa, volumen, etc. utilizadas en el programa, a las fuentes de datos y a los países a los cuales pertenece la información, entre otros.

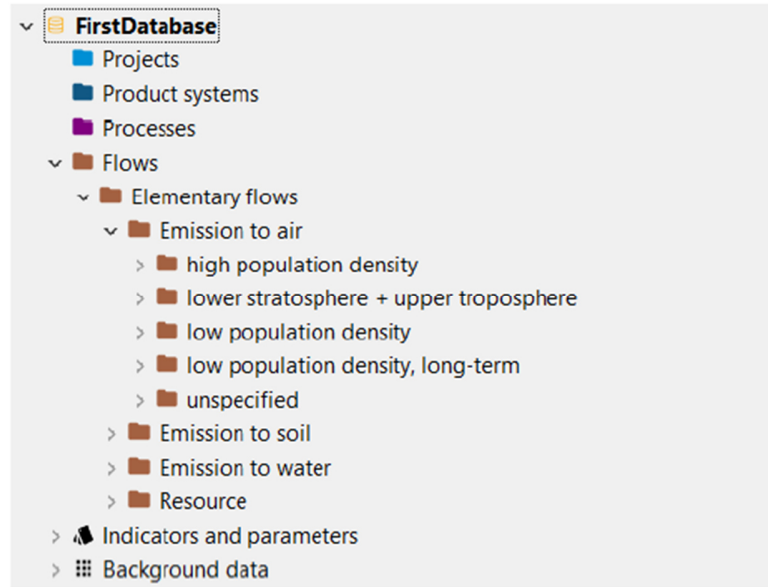


Figura 32 – Base de datos (Captura de pantalla OpenLCA).

El software se basa en la definición de procesos, los cuales involucran entradas y salidas. Luego, los procesos se agrupan/vinculan (las salidas de un primer proceso pueden ser las entradas de un segundo proceso, y así sucesivamente) dando lugar al ciclo de vida de un producto. Se pueden calcular los impactos ambientales para el sistema de producto (individualmente), o bien, se puede definir un “proyecto” en el cual se evalúan los impactos ambientales de diferentes sistemas de producto y se realiza una comparación de los mismos. La Figura 33 muestra la manera en que el software vincula los distintos procesos unitarios para un ejemplo cuyo producto final es “1kg de carne con vegetales”.

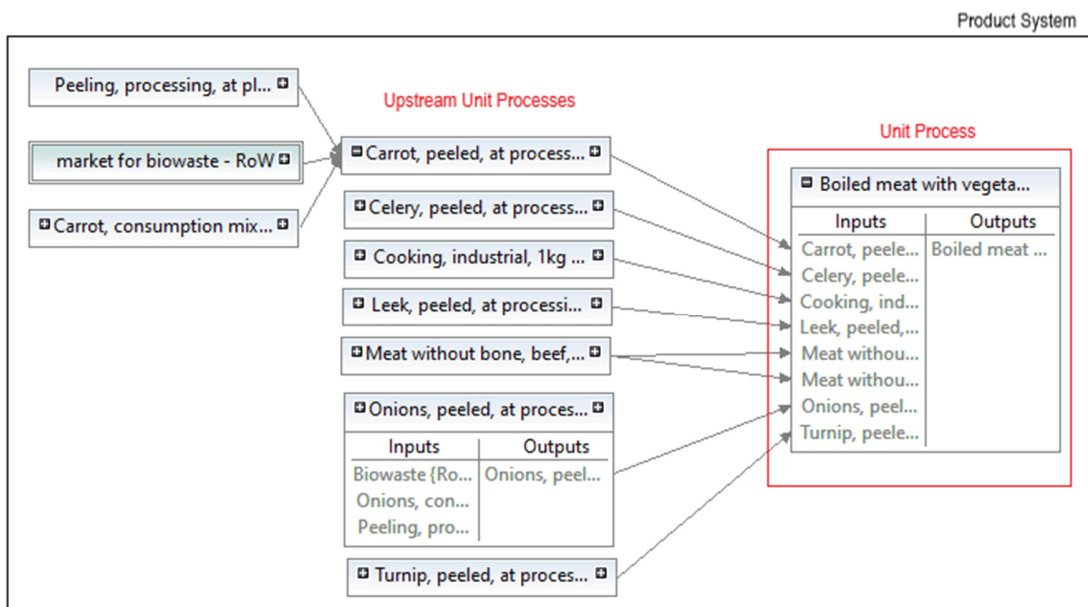


Figura 33 – Límites del sistema de producto y procesos unitarios (Captura de pantalla OpenLCA).

En la Figura 34 y la Figura 35 se muestran capturas de pantalla destinadas a mostrar el aspecto general del software en sus distintas partes.

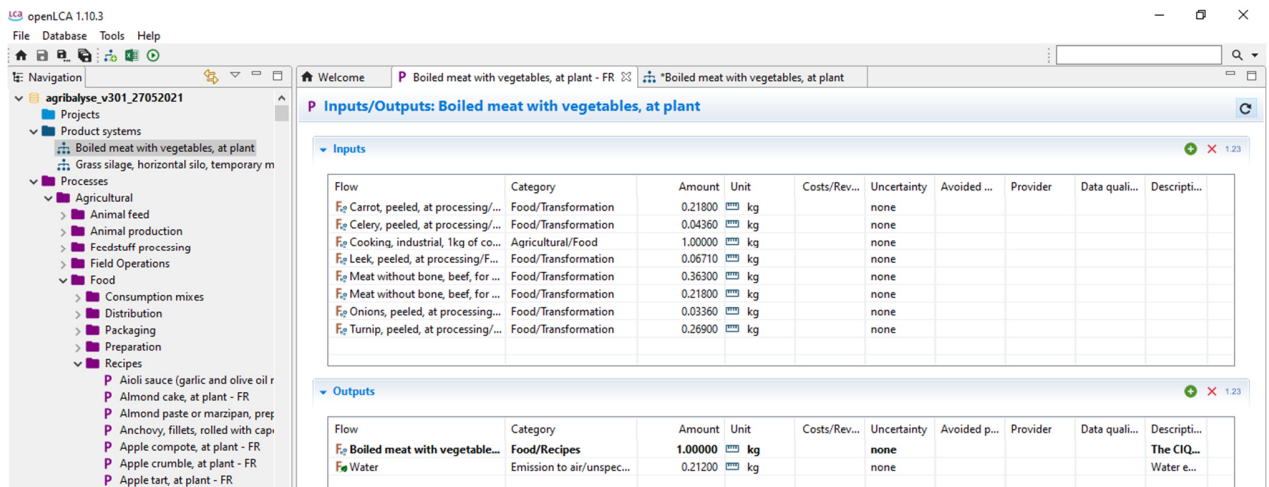


Figura 34 - Captura de pantalla OpenLCA.

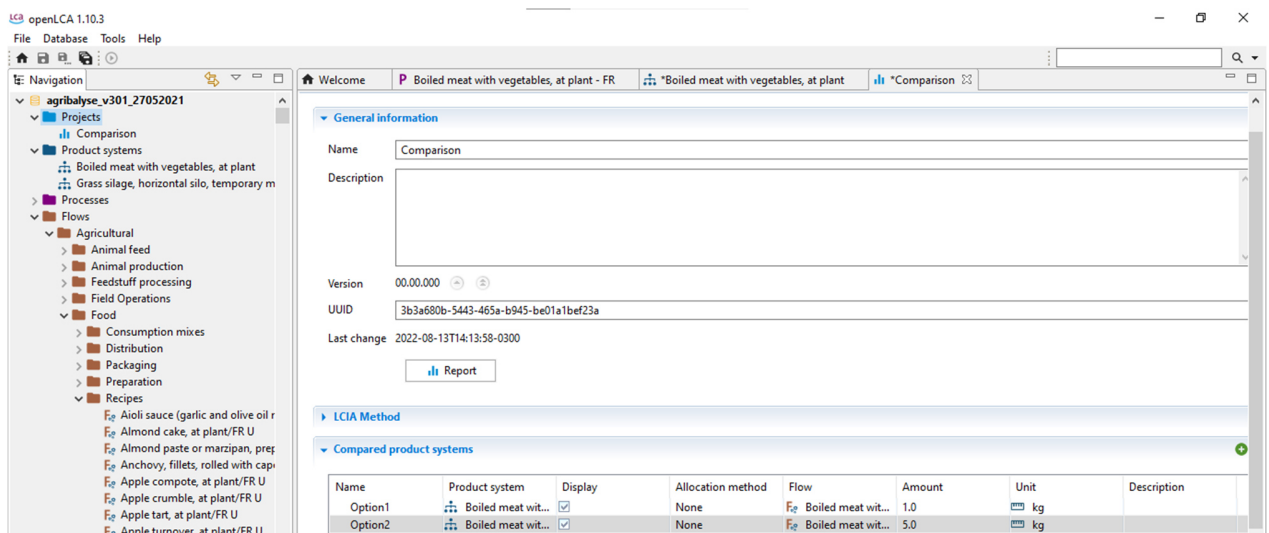


Figura 35 - Captura de pantalla OpenLCA.

Entre las ventajas de este software se destacan su versatilidad, facilidad de uso, aplicación a numerosos sectores productivos y confiabilidad. Existe, además, una gran disponibilidad de información y documentación online, resultado de su amplia utilización en el mercado. Una característica de gran interés es que OpenLCA permite definir a los materiales reciclados como desechos de otros procesos y considera la reutilización de los mismos como "ahorros" de impacto ambiental (Figura 36).

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenu...	Uncertainty	#Avoided waste
Bottle waste	Case study	1.00000	kg		none	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 36 – Consideración de materiales reciclados de OpenLCA

Como desventaja, para el caso del presente estudio, si se decide emplear OpenLCA se tendrán que definir una gran cantidad de procesos y flujos y cuantificarlos mediante búsqueda bibliográfica dado que la construcción de pavimentos flexibles tiene casi nulo desarrollo en las bases de datos gratuitas. En general, los sectores más desarrollados son el agrícola/ganadero, industria alimenticia y explotación/producción de materias prima, recursos y energía.

6.3.2. PaLATE

(2008) - <http://faculty.ce.berkeley.edu/horvath/palate.html>

El programa PaLATE (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects) está destinado a la realización de ACV de pavimentos rígidos y flexibles. Es una metodología de tipo híbrida que combina información basada en procesos e información de tipo EIO-LCA (Economic Input-Output Life Cycle Assessment). El mismo está basado en Microsoft Excel y fue diseñado por el Consortium on Green Design and Manufacturing de la Universidad de California-Berkeley. Además, permite llevar a cabo el análisis del costo del ciclo de vida (en inglés: Life Cycle Cost Analysis LCCA).



Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects

Figura 37 - Logo del Software PaLATE [50]

PaLATE consta de una serie de hojas de cálculo, entre las cuales se destacan:

- **Des:** descripción de la estructura (cantidad de capas, espesores, anchos, etc.)

- **Init Const:** volúmenes de cada material a emplear en la construcción inicial, distancia de transporte y vehículo empleado para la movilización de los mismos y de la mezcla elaborada.
- **Eqmt:** descripción de equipos a emplear para la construcción (consumo de combustible, rendimiento, productividad, etc.)
- **Env Results:** resultados de emisiones de distintos gases y valores de GWP, consumo de agua, consumo de energía y otras categorías de impacto.
- **EMF:** emisiones de distintos gases generadas durante producción de materias prima, transporte, elaboración de mezcla y construcción.

Desde la Figura 38 a la Figura 42 se incorporan capturas de pantalla de las diferentes hojas.

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd ³]
Wearing Course 1				
Wearing Course 2				
Wearing Course 3				
Subbase 1				
Subbase 2				
Subbase 3				
Subbase 4				
Total				

Figura 38 - Hoja "Des" PaLATE (extracto de captura de pantalla)

Material	Density [tons/(yd ³)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
		Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	Volume [yd ³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Virgin Aggregate			0			dump truck
Bitumen						tanker truck
Cement			0			dump truck
Concrete Additives			0			tanker truck
RAP		0	0			dump truck

Figura 39 - Hoja "Init Const" PaLATE (extracto de captura de pantalla)

ACTIVITY	Equipment	Brand/Model	Engine Capacity	Productivity	Fuel Consumption	Fuel Type
Asphalt Paving	Paver	Gomaco T/C 400				diesel
	Pneumatic roller	Dynapac CP221				diesel
	Tandem roller	Ingersol rand DD130				diesel
HMA Production	asphalt mixer	CBI Magnum Force Shingle				oil

Figura 40 - Hoja "Eqmt" PaLATE (extracto de captura de pantalla)

		Energy [MJ]	Water Consumption [kg]	CO ₂ eq.[Mg] = GWP	NO _x [kg]	PM ₁₀ [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]	Hg [g]
Initial Construction	Materials Production								
	Materials Transportation								
	Processes (Equipment)								
Maintenance	Materials Production								
	Materials Transportation								
	Processes (Equipment)								
Total	Materials Production								
	Materials Transportation								
	Processes (Equipment)								
Total									

Figura 41 - Hoja "Env Results" PaLATE (extracto de captura de pantalla)

Sector	CO ₂ eq.	CO	NO _x	SO ₂	PM10	Energy	Electricity	Hg	Pb	RCRA Hazardous Waste Generated	Water Consumption
	units	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	MJ/ton	kWh/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
Ready-mixed concrete	33 509	337	551	484	172	536	19	1.E-03	6.E-02	932	641 509
Blast furnaces and steel	50 815	1 828	969	766	338	8 589	342	1.E+01	4.E+00	13 473	68 270 134
Sand and Gravel	4 174	14	22	11	157	61	5	4.E-07	3.E-03	179	2 087
Bitumen	185 411	448	1 111	853	246	2 170	784	4.E-02	2.E+00	350 942	1 011 797
cement	840 906	1 003	2 275	1 507	269	4	131	6.E-02	3.E-01	1 636	763 628
concrete additives	30 499	11 804	9 374	6 930	3 371	38 464	1 619	7.E-02	5.E+00	573 686	135 825 771
Diesel	543 557	695	2 056	2 753	48	49 909	678	0.045	2	303 191	327 092
water	992	0.002	1.724	2.632	0.001	16.334	0.000	4.E-10	9.E-07	0.03	6
Electric services (utilities)	1 244	0.37	3.56	6.97	0.24	12.90	0.02	4.67E-08	1.89E-04	1.52	307.34

Figura 42 - Hoja "EMF" PaLATE (extracto de captura de pantalla)

Entre las demás hojas que no serán utilizadas en el presente estudio se encuentran todas aquellas destinadas al análisis de costos, las vinculadas a las etapas de mantenimiento y las relacionadas con los impactos generados por lixiviados, entre otras. PaLATE no considera la etapa de uso del pavimento.

El software trabaja con unidades americanas (USCU – United States Customary Units), es decir, pies, pulgadas, yardas y galones, lo cual es un tanto inconveniente para su aplicación en países que utilizan el sistema internacional (SI).

PaLATE utiliza las bases de datos EIO-LCA de Carnegie Mellon University y de Transportation Energy Data Book Edition 29 (2010). El autor Tomás Erich Tisberger Ibañez [51] evalúa en su tesis de grado la validez de los datos existentes en el software (provenientes de EEUU) y elabora tablas con datos más recientes provenientes de Europa, en particular, para la hoja EMF. Sin embargo, el autor concluye que los valores que trae PaLATE por defecto arrojan resultados de ACV mucho más similares (y un tanto menores) a los que se obtienen con SimaPro, uno de los softwares más establecidos en el mercado y considerado sumamente confiable. Es por eso que, en caso de emplear PaLATE para el presente análisis, se utilizará la base de datos por defecto.

Entre las ventajas de PaLATE se destacan su facilidad de uso y sencillez de incorporación de materiales, equipos y demás información de entrada, la manera clara de expresar los resultados y la simplicidad de las operaciones y la posibilidad de seguirlas y modificarlas a gusto.

Entre las desventajas se puede mencionar que los datos de inventario se encuentran desactualizados y muchas veces incompletos y, a diferencia de OpenLCA, el programa no admite “premiar” el uso de materiales reciclados.

PaLATE considera la incorporación de los materiales reciclados de la misma manera en que considera materiales vírgenes, es decir, suma las emisiones generadas por la producción de los mismos (recolección, separación, acondicionamiento, pelletizado/micronizado, etc.) y no tiene en cuenta la magnitud de los impactos ambientales que se están evitando cuando se escoge el reciclaje frente a la disposición en vertederos, incineración u otros. Es por ello que, en la etapa de producción de mezcla asfáltica, los ACV de las mezclas con materiales reciclados arrojan impactos mayores que las mezclas convencionales. Sin embargo, esta tendencia se ve revertida en la etapa de construcción dado que para las mezclas con materiales reciclados se tienen menores espesores.

En conclusión, el uso de mezclas sustentables conduce a menores emisiones, pero se estima que la diferencia debería ser aún mayor si se consideran los impactos que generaría la disposición en vertederos u otras formas de descarte de los materiales reciclables.

6.3.3. LCA Pave

(2021) - <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/lcatool/>

LCA Pave es una herramienta de ACV desarrollada por la US Federal Highway Administration (FHWA) basada en Microsoft Excel que se utiliza para evaluar impactos ambientales de pavimentos y asistir a la toma de decisiones.



Figura 43 - Logo LCA Pave [30].

LCA Pave tiene el objetivo de evaluar, cuantificar y comunicar los impactos ambientales de diversas alternativas de pavimentos flexibles en etapa proyectual, en donde varían los materiales, estructuras, tratamientos, transporte, procesos constructivos y reciclaje. Permite comparar diversas estrategias de

mantenimiento y rehabilitación, así como alternativas de disposición final. La etapa de “uso” no puede ser modelada en LCA Pave actualmente.

El software emplea datos públicos de EEUU con valores promedio y utiliza la metodología de evaluación de impacto ambiental TRACI 2.1 (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts) desarrollada por la US Environmental Protection Agency's (EPA).

La ventana de inicio del programa se ilustra en la Figura 44. El programa consta de dos partes fundamentales:

- **Bibliotecas de datos (Data Libraries)**: Se trata de la base de datos del software y contiene información por defecto y elaborada por el usuario. Existen “bibliotecas” de: Materiales, Equipos, Desechos, Transporte, Mezclas y Actividades.
- **Sesión de Análisis (Analysis Session)**: Corresponde a la interfaz utilizada para modelar alternativas de diseño usando los elementos de la biblioteca, correr el análisis comparativo, producir y mostrar los resultados.

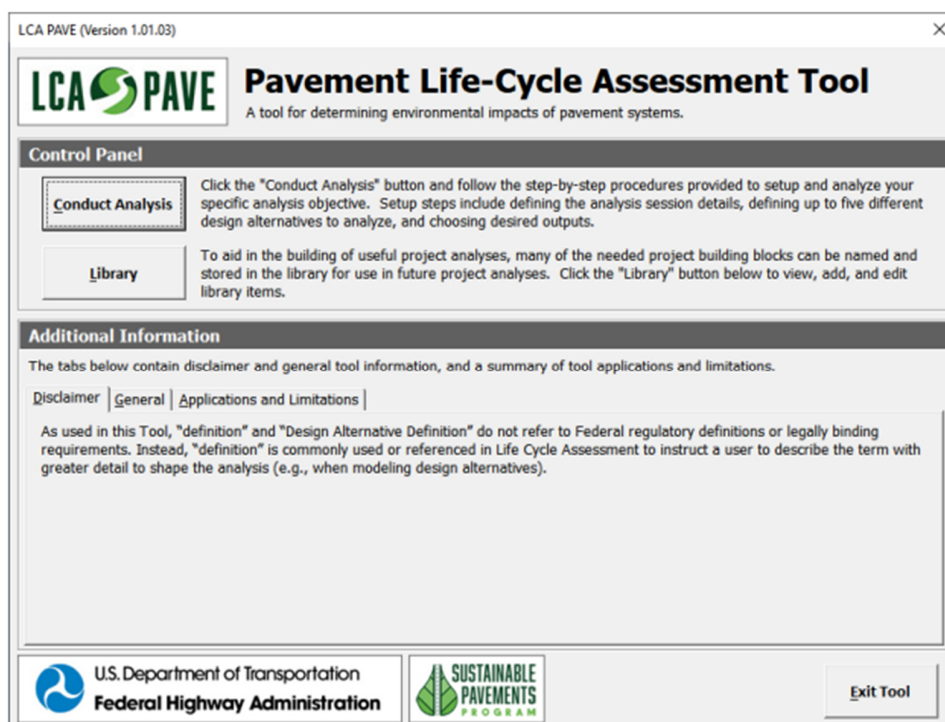


Figura 44 – Pantalla inicial de LCA Pave.

En la Figura 45, Figura 46 y Figura 47 se muestran capturas de pantalla de las distintas componentes del programa.

En la Biblioteca (Figura 45) se encuentran los materiales individuales que componen las mezclas asfálticas, cada uno de los cuales trae asociada una serie de impactos ambientales producto de la manufactura de los mismos. El programa presenta una pestaña llamada “Mix Design” en la que el usuario elige los componentes de la mezcla en estudio y las cantidades de cada uno de ellos. Allí se pueden asignar distancias de transporte de los materiales desde el sitio de producción de los mismos hasta la planta elaboradora de mezcla asfáltica, y también la distancia de transporte de la mezcla elaborada desde la planta a la obra. En la pestaña “Activities” (Figura 45) se puede definir la etapa de construcción.

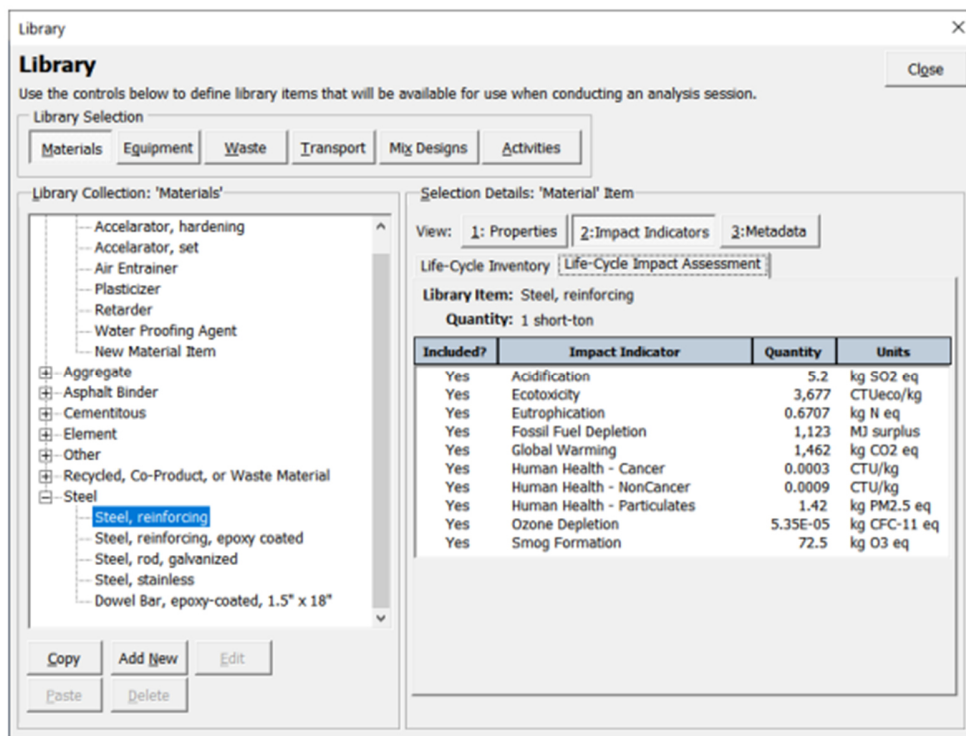


Figura 45 – Biblioteca (Captura de Pantalla de LCA Pave).

En la componente de Análisis (Figura 46) se definen las alternativas a comparar, los impactos que se desean evaluar y los indicadores a considerar. Cuando se define una alternativa, se traen desde la Biblioteca las mezclas y actividades definidas en la etapa anterior y se genera un menú desplegable con todos los procesos que se considerarán en el ACV de la alternativa en cuestión. Finalmente, se muestran los resultados del ACV de la manera elegida (Figura 47).

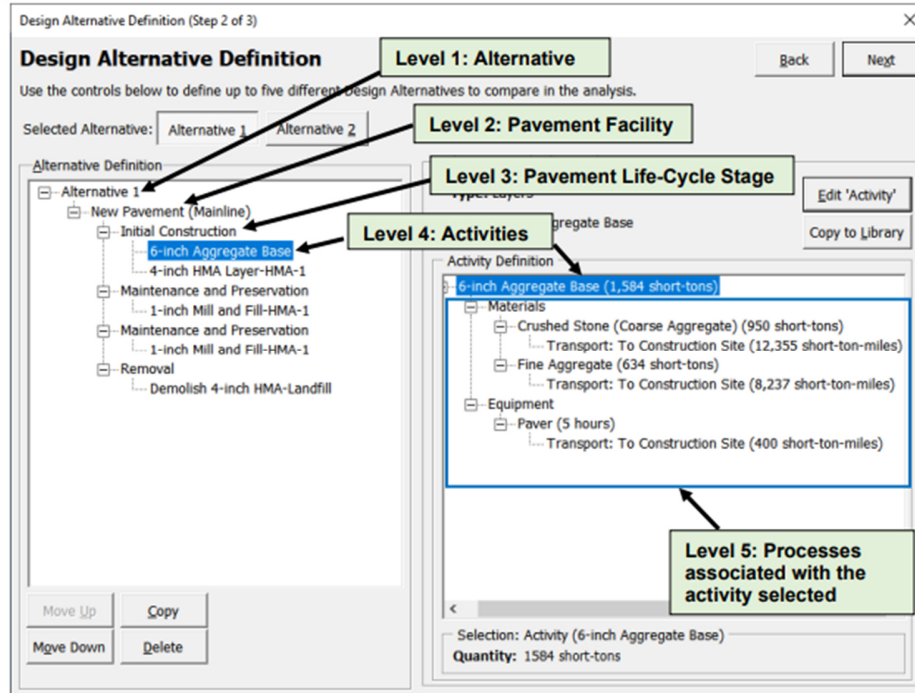


Figura 46 – Pantalla de Análisis (Captura de Pantalla de LCA Pave)

Results (Step 3 of 3)

Results

Use the controls on this page to select impact indicators of interest and view related outputs.

Setup: Results Setup Summary Results: Overall Summary Tree Comparison By Category

Output Results: Overall Summary

Functional Unit: Total (Entire Project)

Impact Indicator	Alternative 1	Alternative 2	Units
Renew. Energy (Non Raw Mat)	422,612	1,157,563	MJ
Renew. Energy (Raw Mat)	42,624	113,728	MJ
Total Renew. Energy Use	432,659	1,238,715	MJ
Nonrenew. Energy (Non-Raw Mat)	6,929,543	15,721,562	MJ
Nonrenew. Energy (Raw Mat)	4,280,400	4,123,800	MJ
Total Nonrenew. Energy	10,930,825	19,587,124	MJ
Recycled Matl. Use	0	0	Short-tons
Disposed Non-Hazardous Waste	13,238	11,484	Short-tons
Disposed Hazardous Waste	1,164	1,148	Short-tons
Disposed Radio-Active Waste	0	0	Short-tons
Net Use of Fresh Water	-1.44E+06	-4.40E+06	Cubic meters
SCM Usage	0	0	Short-tons
Acidification	2,058	4,480	kg SO2 eq
Ecotoxicity	79,429	234,742	CTUeco/kg
Eutrophication	312	642	kg N eq
Fossil Fuel Depletion	837,169	1,238,962	MJ surplus
Global Warming	495,136	1,065,372	kg CO2 eq
Human Health - Cancer	0.0016	0.0048	CTU/kg
Human Health - NonCancer	0.0237	0.0702	CTU/kg
Human Health - Particulates	506	1,421	kg PM2.5 eq
Ozone Depletion	0.0199	0.0545	kg CFC-11 eq
Smog Formation	32,453	59,612	kg O3 eq
Analysis Period:	50 yrs	50 yrs	
Total Lane-Miles:	1.00 ln-mi	1.00 ln-mi	
Total Area:	63,360 sf	63,360 sf	

Figura 47 – Pantalla de resultados (Captura de Pantalla LCA Pave).

Una de las mayores ventajas de este software es el ser específico para pavimentos. Posee, además, una manera muy clara y sencilla de introducir y mostrar la información. La base de datos es sumamente transparente y actualizada y está basada en una serie de declaraciones ambientales de producto (en

inglés, Environmental Product Declaration, EPD). Se trata de documentos o informes normalizados por la Norma Internacional UNE-EN ISO 14025 que proporcionan información cuantificada y verificable sobre el desempeño ambiental de un cierto producto.

Una de las desventajas del software es su poco tiempo de vida: al ser muy nuevo (2021) aún tiene fallas de programación y presenta bastantes inconvenientes para funcionar correctamente. Además, el programa emplea unidades imperiales, lo que lo torna un tanto inconveniente para usuarios internacionales.

Con respecto a los materiales reciclados, el programa permite incorporarlos en el diseño de mezclas como tales y les “carga” los impactos asociados al proceso de acondicionamiento para poder ser introducidos en las nuevas mezclas. Si bien LCA_Pave al igual que PaLATE no premia el uso de materiales reciclados, sí permite evaluar los impactos ambientales que se generarían si esos residuos fuesen dispuestos en vertederos o sometidos a algún otro proceso de fin de vida. Por lo tanto, al contar con esta útil herramienta comparativa se opta por el uso de este software para la realización de los ACV del presente estudio.

6.4. Determinación ACV para las distintas mezclas

Como se mencionó en 6.3.3, el software a emplear para el desarrollo del ACV es LCA_Pave. En la Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 se muestran las distintas cantidades de cada componente a incluir en la modelización de las mezclas asfálticas en estudio. Se trata de las cantidades necesarias de cada material para construir 1 km de base asfáltica de un determinado tipo de mezcla. Los valores se indican en toneladas cortas (short-ton) dado que el software trabaja con esa unidad de masa.

Tabla 17 – Cantidad de mezcla asfáltica necesaria para realizar 1 km de base asfáltica

Mezcla	Espesor Base Asfáltica [m]	Volumen de material [m3]	Densidad mezcla [ton/m3]	Cantidad de mezcla [ton]	Cantidad de mezcla [ston]
CAC CA20 SBVS	0,14	511,0	2,325	1188	1310
CAC CA20 SBVH	0,13	474,5	2,447	1161	1280
CAC CA20 BVS	0,14	511,0	2,300	1175	1296
CAC CA20 BVH	0,14	511,0	2,426	1240	1367
CAC CA20 3M	0,15	547,5	2,340	1281	1412
CAC CA20 NFU	0,13	474,5	2,446	1161	1279
ECSE MTE	0,16	584,0	2,428	1418	1563
CAC D19 CA30	0,17	620,5	2,414	1498	1651
CAC D19 AM3	0,15	547,5	2,460	1347	1485
CAC D19 AAMP	0,11	401,5	2,532	1016,6	1121

Tabla 18 - Cantidad de agregados necesarios para realizar 1 km de base asfáltica.

Mezcla	Agregado grueso 6-20 [%peso]	Agregado fino 0-6 [%peso]	Cantidad de agregado grueso [ton]	Cantidad de agregado fino [ton]	Cantidad de agregado grueso [ston]	Cantidad de agregado fino [ston]
CAC CA20 SBVS	36,3	56,8	431,6	675,0	475,7	744,0
CAC CA20 SBVH	37,0	57,9	429,5	671,9	473,5	740,6
CAC CA20 BVS	36,3	56,8	426,9	667,7	470,6	736,0
CAC CA20 BVH	37,0	57,9	458,6	717,3	505,5	790,7
CAC CA20 3M	36,1	56,4	462,3	723,1	509,6	797,0
CAC CA20 NFU	47,0	47,8	545,6	555,3	601,4	612,1
ECSE MTE	47,5	47,5	673,5	673,5	742,4	742,4
CAC D19 CA30	37,1	58,0	555,0	868,0	611,7	956,8
CAC D19 AM3	47,2	48,1	636,2	647,5	701,3	713,7
CAC D19 AAMP	46,0	49,8	467,4	506,5	515,3	558,3

Tabla 19 - Cantidad de ligante asfáltico necesario para realizar 1 km de base asfáltica.

Mezcla	Cantidad de ligante [ton]	Cantidad de ligante [ston]
CAC CA20 SBVS	58,2	64,2
CAC CA20 SBVH	58,0	63,9
CAC CA20 BVS	57,6	63,5
CAC CA20 BVH	61,9	68,2
CAC CA20 3M	58,5	64,4
CAC CA20 NFU	54,3	59,8
ECSE MTE	70,9	78,2
CAC D19 CA30	74,9	82,6
CAC D19 AM3	63,3	69,8
CAC D19 AAMP	42,7	47,0

Tabla 20 - Cantidad de materiales reciclados para realizar un 1km de base asfáltica

Mezcla	Cantidad de residuo [ton]	Cantidad de residuo [ston]
CAC CA20 SBVS	23,3	25,7
CAC CA20 SBVH	1,7	1,9
CAC CA20 BVS	23,0	25,4
CAC CA20 BVH	1,9	2,0
CAC CA20 3M	37,3	41,1
CAC CA20 NFU	5,4	6,0

Las distancias de transporte, tanto de la materia prima como de la mezcla elaborada, se consideran iguales en todos los casos. Se sabe que esta consideración no es representativa de lo que sucede en la realidad, pero se toma la decisión de igual manera para simplificar el análisis comparativo. Las

distancias se introducen en millas (miles) y el software multiplica automáticamente estas distancias por la cantidad de toneladas de material a transportar, dando lugar a un valor en short-ton-miles (*masa x distancia*).

- Camión: Combination truck
- Combustible: diésel
- Distancia desde el lugar de producción de materiales vírgenes a planta: 300 km (186,4 millas)
- Distancia desde el lugar de producción de materiales reciclados a planta: 80 km (50 millas)
- Distancia de planta a obra: 20 km (12,4 millas)

Con respecto a la elaboración y colocación de la mezcla, se plantea para todas las mezclas la producción en planta asfáltica continua (drum plant) y la colocación y compactación con los mismos equipos, también a los fines de simplificar el análisis. La producción de mezcla asfáltica se mide en toneladas cortas. El uso de los equipos se mide en horas (hours), por lo que es necesario calcular e introducir en el software la cantidad de horas requeridas para la colocación y compactación de la cantidad de mezcla asfáltica que corresponda. La Tabla 21 y la Tabla 22 muestran la cantidad de horas de uso de cada equipo y los tipos de equipos con sus rendimientos, respectivamente.

Tabla 21 - Equipos empleados y tiempo de uso en horas para la colocación de 1 km de base asfáltica

Mezclas	Terminadora [h]	Rodillo neumático [h]	Aplanadora Vibrante [h]
CAC CA20 SBVS	8	10	10
CAC CA20 SBVH	8	10	10
CAC CA20 BVS	8	10	10
CAC CA20 BVH	8	10	10
CAC CA20 3M	9	11	11
CAC CA20 NFU	8	10	10
ECSE MTE	9	12	12
CAC D19 CA30	10	12	12
CAC D19 AM3	9	11	11
CAC D19 AAMP	7	8	8

Por un lado, toda la información de la Tabla 18 a la Tabla 20 se introduce en el software dentro de la pestaña “Mix Design”. Por otro lado, la información de la Tabla 21 se incorpora en la pestaña “Activities”. Así se obtiene un esquema como el de la Figura 48.

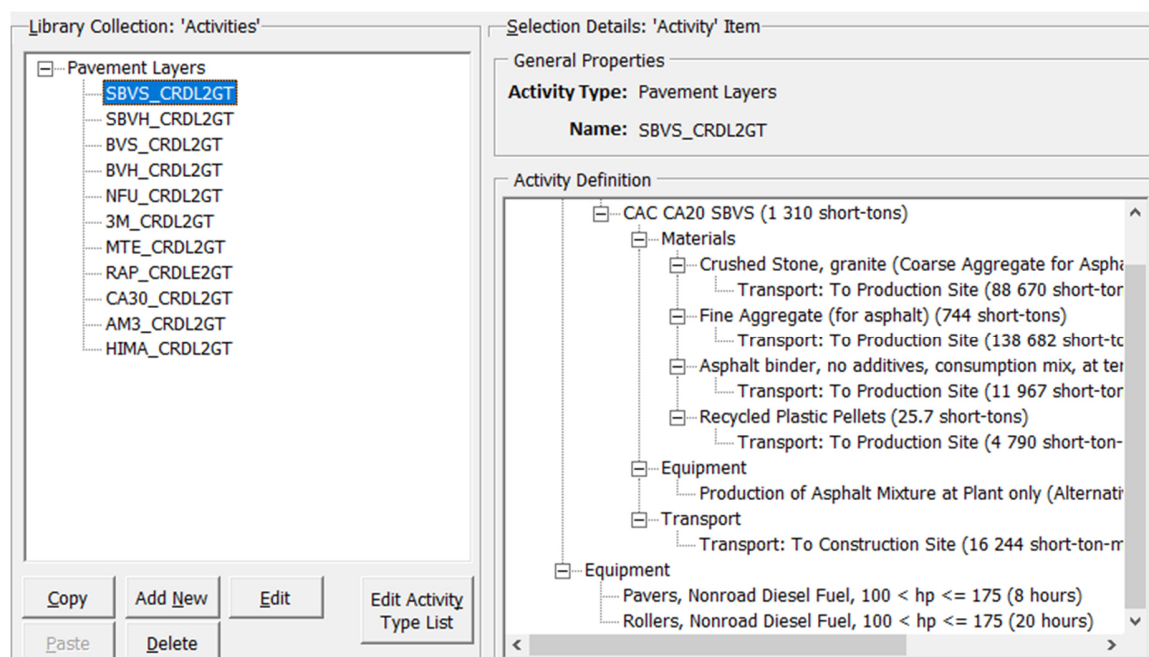


Figura 48 – Captura de pantalla LCA_Pave. Pestaña “Activity” para mezcla con SBVS.

Para modelar la producción de mezclas asfálticas templadas se reducen en un 20% las implicancias ambientales de la producción de mezclas en caliente, en base a lo visto en el estudio bibliográfico. Para la mezcla CAC CA20 3M se añade el uso de un equipo (molino) de micronizado, el cual se emplea durante 16 hs. Las mezclas que incluyen materiales reciclados y asfalto modificado emplean un equipo adicional destinado a la mezcla por vía húmeda del betún con los polímeros. La misma se denomina Mezcladora PMB (Polymer-Modified-Bitumen) y las horas de uso de este equipo se incluyen en la Tabla 23.

Tabla 22 - Listado de equipos

Tipo	Potencia [hp]	Consumo de combustible [lts/H*hp]	Consumo de combustible [lts/H]	Tipo de Combustible	Productividad [ton/h]
Mezcladora PMB	80	-	-	diesel	14,4
Molino de Micronizado	80	-	-	diesel	0,4
Terminadora	160	0,14	22,4	diesel	150
Rodillo neumático	110	0,12	13,2	diesel	120
Aplanadora Vibrante	110	0,12	13,2	diesel	120
Planta Asfáltica Cont.	<i>Datos provistos por el software</i>				

Tabla 23 - Horas de uso de mezcladora PMB

Denominación	Mezcladora PMB [h]
CAC CA20 SBVH	4,0
CAC CA20 BVH	4,3
CAC CA20 3M	4,1
CAC CA20 NFU	3,8
CAC D19 AM3	4,4
CAC D19 AAMP	3,0

Finalmente, se procede a la ejecución del análisis. Se define la construcción de un pavimento nuevo, con un periodo de diseño de 15 años y sin etapas de mantenimiento o rehabilitación. La unidad funcional es 1km (lo que equivale a 3281 pies) y se considera un solo carril de ancho 3,65 m (equivalente a 12 pies). El software utiliza la metodología de asignación de impactos TRACI 2.1, cuyas consideraciones se incorporan en el Anexo 2, junto con los datos de impactos ambientales de los materiales empleados en el presente trabajo. Los resultados obtenidos en términos de calentamiento global (GWP) se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24 - Resultados del ACV con etapas de transporte incluidas.

Mezcla	Cantidad de mezcla [ton]	KG CO2 eq / km	KG CO2 eq / ton mezcla
CAC CA20 SBVS	1188	105628	89
CAC CA20 SBVH	1161	102704	88
CAC CA20 BVS	1175	104498	89
CAC CA20 BVH	1240	109643	88
CAC CA20 3M	1281	110205	86
CAC CA20 NFU	1161	101282	87
ECSE MTE	1418	98664	70
CAC D19 CA30	1498	132413	88
CAC D19 AM3	1347	124311	92
CAC D19 AAMP	1017	70295	69

Como gran parte de la bibliografía analizada comenta que los resultados del ACV son fuertemente dependientes de las distancias de transporte, se decide eliminar dichas distancias y realizar un segundo análisis sin considerar transporte. Tales resultados se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25 - Resultados del ACV sin incluir etapas de transporte.

Mezcla	Cantidad de mezcla [ton]	KG CO2 eq / km	KG CO2 eq / ton mezcla	Diferencia
CAC CA20 SBVS	1188	46677	39	-0,56
CAC CA20 SBVH	1161	45091	39	-0,56
CAC CA20 BVS	1175	46181	39	-0,56
CAC CA20 BVH	1240	48134	39	-0,56
CAC CA20 3M	1281	48470	38	-0,56
CAC CA20 NFU	1161	43701	38	-0,57
ECSE MTE	1418	28308	20	-0,71
CAC D19 CA30	1498	58071	39	-0,56
CAC D19 AM3	1347	57474	43	-0,54
CAC D19 AAMP	1017	22999	23	-0,67

Se observa que la incidencia del transporte es del 60% en promedio, por lo que la decisión de cuál es la mezcla ambientalmente más amigable va a depender fuertemente de las distancias de transporte que se tengan para cada obra en particular.

Se destaca que en los análisis realizados se han incluido los impactos ambientales del procesamiento y acondicionamiento que necesitan los materiales reciclados para ser incorporados en las mezclas. Estos impactos deben ser contrastados con los que se generarían si estos residuos fuesen dispuestos en vertederos o rellenos sanitarios. Los datos públicos obtenidos del software Open LCA indican que la disposición en vertedero de 1 tonelada corta de desechos plásticos genera 63,70 kg CO2 eq y la incineración de estos residuos produce 182 kg CO2 eq. Con respecto a la disposición de NFU no se tienen datos. Sin embargo, la disposición de NFU en vertederos se encuentra prohibida o restringida en muchos países por dar lugar a un ambiente propicio para el desarrollo de vectores y potenciales incendios. La incineración de NFU genera 1223,22 kg CO2 eq por tonelada corta de material. La Tabla 26 muestra las emisiones generadas por los diferentes tipos de disposición para las cantidades de materiales reciclados de cada mezcla.

Tabla 26 – Emisiones de diferentes disposiciones de los residuos.

Mezcla	Cantidad de Residuo [ston]	Plástico en Vertedero [kg CO2 eq]	Incineración Plástico [kg CO2 eq]	Incineración NFU [kg CO2 eq]
CAC CA20 SBVS	25,68	1635,73	4673,53	-
CAC CA20 SBVH	1,92	122,11	348,88	-
CAC CA20 BVS	25,40	1618,15	4623,28	-
CAC CA20 BVH	2,05	130,37	372,50	-
CAC CA20 3M	41,13	2620,13	7486,09	-
CAC CA20 NFU	5,98	-	-	7320,80

A la hora de comparar el potencial de calentamiento global de las diferentes mezclas resulta necesario considerar las emisiones de la Tabla 26, que son las emisiones evitadas/ahorradas por el reciclado de estos materiales. Se decide restar las emisiones asociadas a la incineración de residuos a aquellas de la Tabla 24. Estos resultados se muestran en la Tabla 27. La Figura 49 y la Figura 50 grafican los resultados de impacto ambiental, en términos de calentamiento global, para todas las mezclas estudiadas, discriminando la etapa de transporte y disposición (incineración).

Tabla 27 – GWP sustraídas las emisiones asociadas a la incineración.

Mezcla	KG CO2 eq / km
CAC CA20 SBVS	100 954
CAC CA20 SBVH	102 355
CAC CA20 BVS	99 875
CAC CA20 BVH	109 271
CAC CA20 3M	102 719
CAC CA20 NFU	93 961
ECSE MTE	98 664
CAC D19 CA30	132 413
CAC D19 AM3	124 311
CAC D19 AAMP	70 295

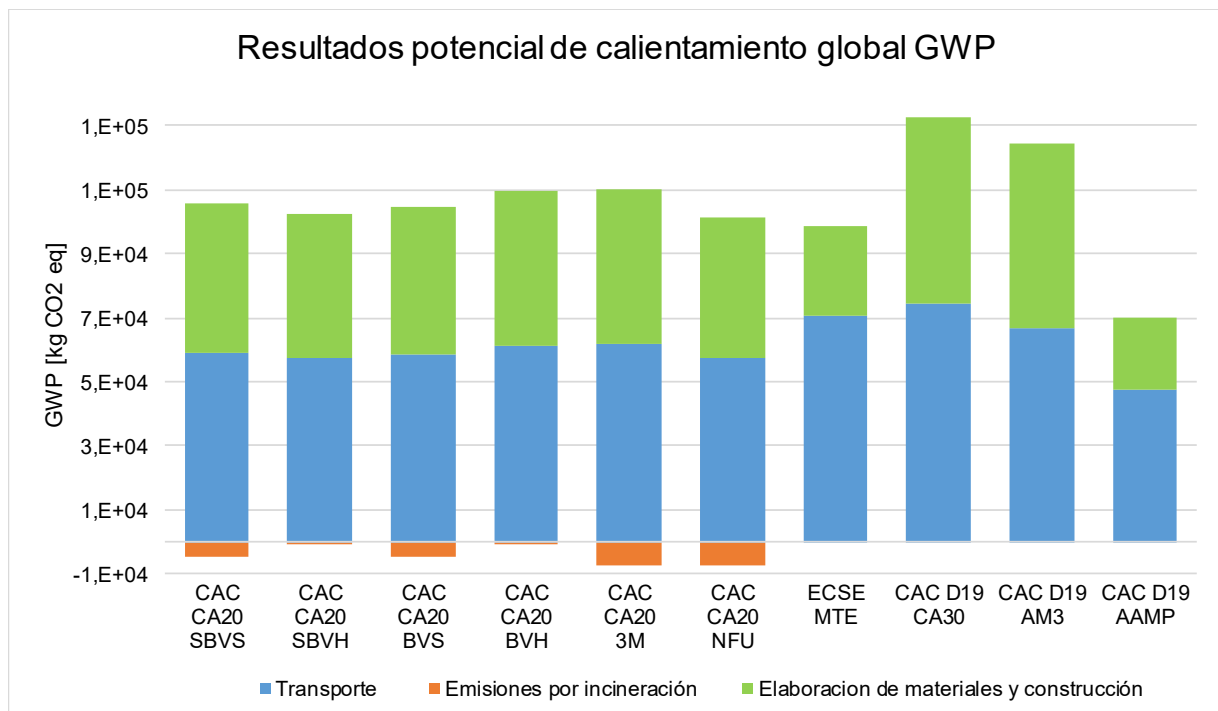


Figura 49 – Resultados de impacto ambiental de las mezclas estudiadas, en términos de calentamiento global.

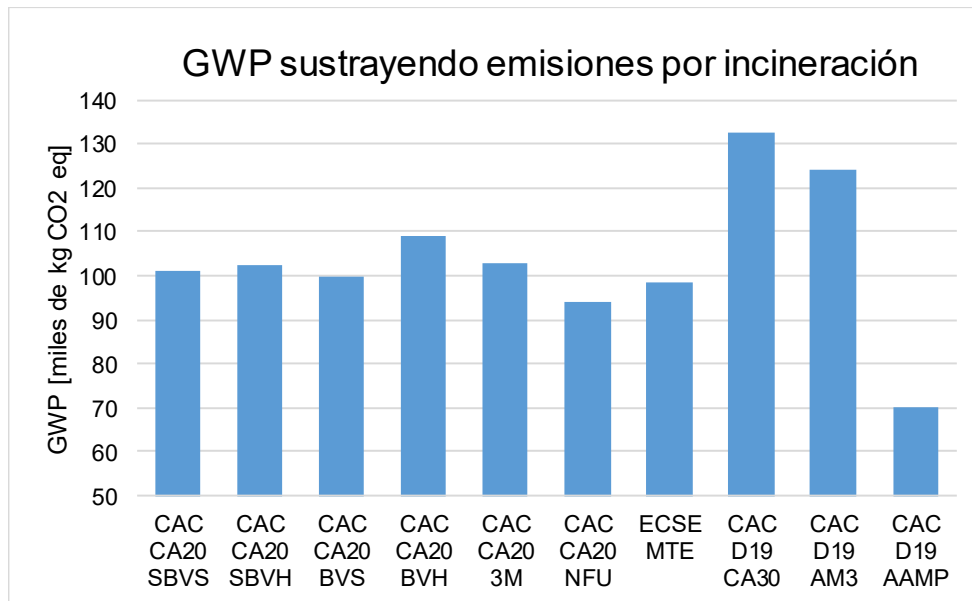


Figura 50 - GWP final (restando las emisiones generadas por la incineración).

Se observa que:

- La mezcla de control CA30 es la más nociva para el medio ambiente, dentro de las estudiadas.
- La mezcla AM3 presenta una reducción del 6% de GWP con respecto a la mezcla convencional. Por un lado, las propiedades mecánicas de la mezcla AM3 permiten el uso de menores espesores, pero, por el otro, su elaboración incluye polímeros vírgenes como materia prima, los cuales aumentan el impacto ambiental. De todas maneras, el resultado es favorable frente a la CA30.
- La mezcla templada MTE presenta una reducción del 25% de GWP con respecto a la mezcla convencional. Los espesores a los que se ha arribado para ambas mezclas difieren poco (1 cm), es por ello que la diferencia no se debe principalmente a la cantidad de materiales empleados, sino que se basa en la menor temperatura de producción de la mezcla y en el hecho de prescindir del secado de los áridos dado que se usa emulsión.
- Las mezclas SBVS, SBVH, BVS y BVH presentan reducciones del 24%, 23%, 25% y 17% respecto a la mezcla convencional, respectivamente. Tales porcentajes se deben a las diferencias de espesores de estas mezclas con respecto a la CA30 y a la cantidad de material reciclado que incorporan.
- La mezcla con 3% de plástico micronizado presenta una reducción de impactos del 22% respecto a la mezcla convencional. Este valor es similar a los resultados obtenidos para las demás mezclas que incorporan plásticos. La elevada rigidez de esta mezcla conduce a un mal comportamiento a fatiga y por ende se requieren espesores mayores que para las otras mezclas

con plásticos, por ello se estima que las menores emisiones se deben a la gran cantidad de plásticos que incorpora esta mezcla, lo cual se premia al restar las emisiones por incineración.

- La mezcla AAMP presenta una reducción de impactos del 48% respecto a la mezcla convencional, gracias a los bajos espesores que se logran. Por ello, las bondades ambientales de esta mezcla se basan en la gran reducción del empleo de materiales vírgenes.
- La mezcla con NFU presenta una reducción del 29% respecto a la mezcla convencional. Cabe destacar que tal valor se debe al ahorro de impacto ambiental que genera el reciclado de NFU y a las propiedades que el caucho le confiere a la mezcla, lo que conduce a un mejor comportamiento a fatiga y menores espesores.
- Los resultados de la Figura 51 muestran que la reducción de espesores lograda para las mezclas con incorporación de plásticos genera una disminución de emisiones de alrededor del 20%, comparando con la mezcla convencional, gracias al menor empleo de materiales vírgenes. En la misma figura, se observa que esta reducción es mucho más elevada para la mezcla AAMP (60%). Por su parte, la mezcla templada MTE presenta una reducción de emisiones respecto a la mezcla convencional del 50%, pero esta vez la misma no se da principalmente por la disminución de espesores, sino por la menor energía requerida para la elaboración de la mezcla.
- La Figura 52 pone de manifiesto las emisiones asociadas únicamente a la etapa de transporte, las cuales dependen directamente de la cantidad de materiales a transportar.

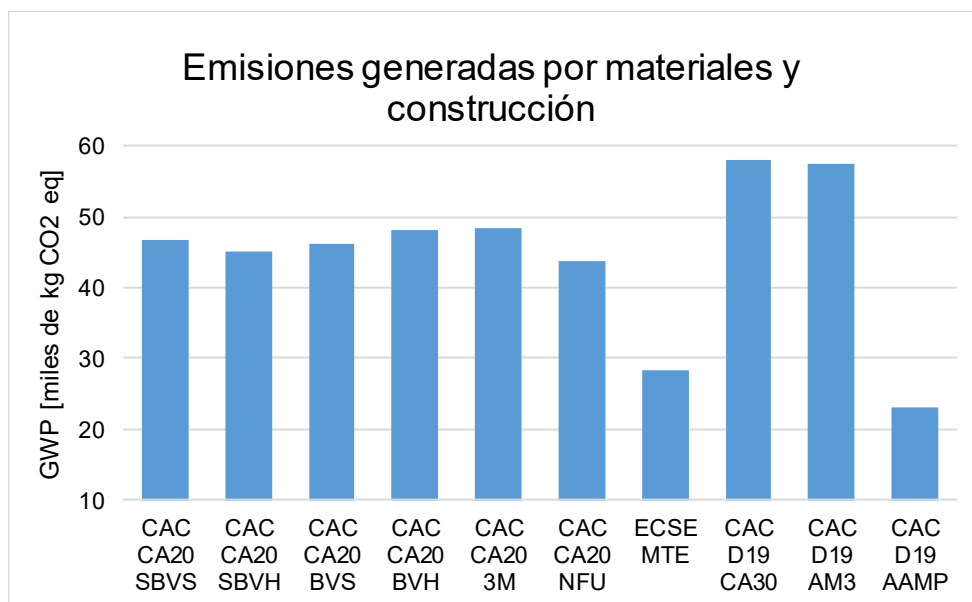


Figura 51 - GWP etapas de elaboración de materiales y construcción.

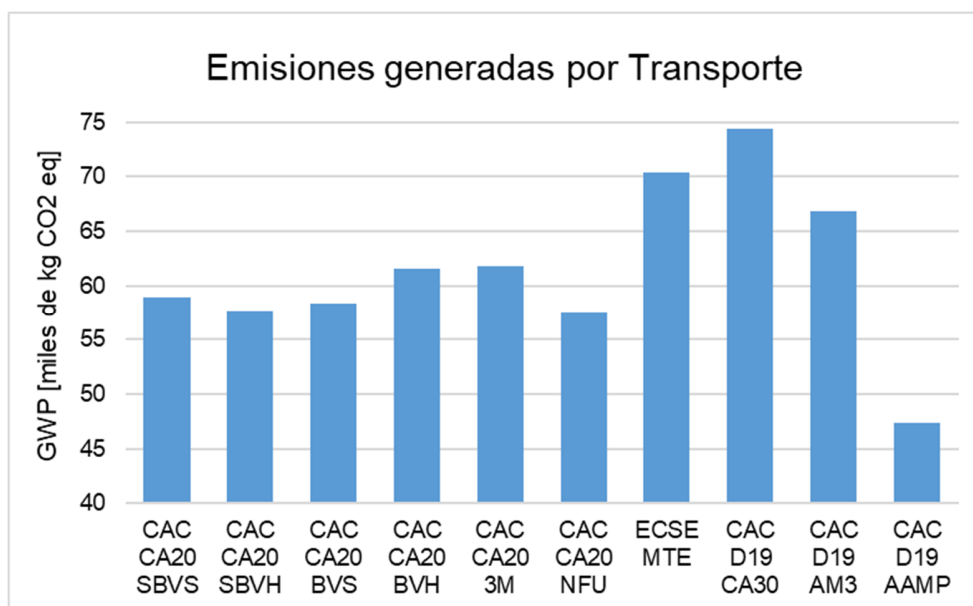


Figura 52 - GWP generado en las etapas de transporte.

7. ESTUDIO DE COSTOS

El estudio de costos pretende comparar las diferentes bases asfálticas en términos económicos. Actualmente, la situación económica de Argentina se encuentra atravesando una etapa de extrema inestabilidad, caracterizada por una creciente inflación que impacta enormemente en los precios de los derivados del petróleo. Es por ello que los valores que se obtienen en el presente estudio probablemente no sean representativos de la realidad dentro de un breve periodo de tiempo. Sin embargo, se estima que los resultados del proceso comparativo sí tendrán validez.

Se evalúa el costo de elaborar 1km de base asfáltica empleando cada una de las mezclas en estudio. Con el objetivo de llevar a cabo un análisis simplificado, se consideran únicamente el costo de los materiales y el costo del combustible para las operaciones de producción, transporte y colocación. Se excluyen del análisis todos los demás costos fijos y variables. Se tienen en cuenta los precios unitarios de:

- Materiales (agregados, ligante asfáltico, residuos).
- Transporte desde el sitio de producción de los materiales hasta la planta de elaboración de la mezcla.
- Elaboración de mezcla asfáltica (solo la operación de planta asfáltica).
- Construcción de base asfáltica (solo colocación y compactación).

A los fines comparativos, no se considera el transporte de la mezcla elaborada desde la planta hacia el sitio de construcción por ser igual en todos los casos.

Los precios unitarios de materiales y combustibles a considerar se incluyen en la Tabla 28, y en la Tabla 29 y la Tabla 30, los consumos asociados al transporte de materiales. Los consumos de la planta asfáltica varían según la temperatura de elaboración de la mezcla. Se considera que la producción de CAC CA30 consume 7 litros/ton mezcla, mientras que para la mezcla templada se tiene 5 litros/ton mezcla y 10 litros/ton mezcla para las demás.

Tabla 28 - Precios unitarios de materia prima

Material	Precio Unitario
Aridos [\$/ton]	
Agregado fino (0 - 6)	1 440,27
Agregado grueso (6 - 20)	2 626,94
Ligantes asfálticos [\$/ton]	
CA30	153 500,00
CA20	145 825,00
AM3	199 550,00
Emulsión asfáltica	107 590,00
AAMP	230 250,00
Materiales Reciclados [\$/ton]	
Pellets PEAD y PEBD	208 237,50
PE Micronizado	236 000,00
Polvo de caucho	100 000,00
Combustibles [\$/lts]	
Gasoil	188,71
Fuel-oil	121,09

Tabla 29 – Consumo de combustible de los equipos a emplear

Planilla de Equipos						
Tipo	Potencia [hp]	Consumo [lts/H*hp]	Consumo [lts/H]	Tipo de Combustible	Productividad [ton/h]	Consumo [lts/ton mezcla]
Terminadora	160	0,14	22,4	gasoil	150	0,15
Rodillo neumático	110	0,12	13,2	gasoil	120	0,11
Aplanadora vibrante	110	0,12	13,2	gasoil	120	0,11
Planta continua mezcla convencional	-	-	-	fueloil	-	7,00
Planta continua mezcla con asfalto modificado	-	-	-	fueloil	-	9,00
Planta continua mezcla con emulsión	-	-	-	fueloil	-	5,00

Tabla 30 - Consumo de combustible asociado al transporte de materiales

Transporte por camiones	
Combustible	gasoil
Consumo [lts/km]	0,3
Distancia áridos y ligante [km]	300
Distancia residuos [km]	80

Empleando las cantidades de materiales descriptas en la Tabla 31, se arriba a los costos (en pesos argentinos) que muestra la Tabla 32 y la Tabla 33.

Tabla 31 - Tabla resumen de materiales empleados en cada mezcla.

Nº	Denominación	Cantidad de mezcla [ton]	Cantidad de agregado grueso [ton]	Cantidad de agregado fino [ton]	Cantidad de ligante [ton]	Cantidad de residuo [ton]
1	CAC CA20 SBVS	1188	432	675	58	23
2	CAC CA20 SBVH	1161	430	672	58	2
3	CAC CA20 BVS	1175	427	668	58	23
4	CAC CA20 BVH	1240	459	717	62	2
5	CAC CA20 3M	1281	462	723	58	37
6	CAC CA20 NFU	1161	546	555	54	5
7	ECSE MTE	1418	674	674	71	0
8	CAC D19 CA30	1498	555	868	75	0
9	CAC D19 AM3	1347	636	647	63	0
10	CAC D19 AAMP	1017	467	507	43	0

Tabla 32 - Resultados del análisis de costos.

Denominación	Costo de materiales [\$]	Costo de transporte de materiales [\$]	Costo de elaboración mezcla [\$]	Costo de colocación mezcla [\$]	COSTO TOTAL [\$]
CAC CA20 SBVS	\$ 15 449 538	\$ 19 888 003	\$ 1 294 776	\$ 82 805	\$ 36 715 123
CAC CA20 SBVH	\$ 10 911 367	\$ 19 698 372	\$ 1 265 380	\$ 80 925	\$ 31 956 045
CAC CA20 BVS	\$ 15 283 414	\$ 19 674 154	\$ 1 280 853	\$ 81 914	\$ 36 320 336
CAC CA20 BVH	\$ 11 649 859	\$ 21 031 577	\$ 1 351 022	\$ 86 402	\$ 34 118 861
CAC CA20 3M	\$ 19 587 168	\$ 21 294 169	\$ 1 396 210	\$ 89 292	\$ 42 366 841
CAC CA20 NFU	\$ 10 693 461	\$ 19 644 350	\$ 1 264 862	\$ 80 892	\$ 31 683 566
ECSE MTE	\$ 10 367 249	\$ 24 082 355	\$ 858 499	\$ 98 826	\$ 35 406 930
CAC D19 CA30	\$ 14 204 339	\$ 25 439 963	\$ 1 269 654	\$ 104 398	\$ 41 018 354
CAC D19 AM3	\$ 15 237 005	\$ 22 877 127	\$ 1 467 962	\$ 93 881	\$ 39 675 976
CAC D19 AAMP	\$ 11 857 747	\$ 17 272 626	\$ 1 108 336	\$ 70 881	\$ 30 309 592

Tabla 33 - Comparativa de costos respecto a la mezcla convencional.

Denominación	COSTO TOTAL [\$]	Variación respecto a CA30	COSTO TOTAL [\$/ton]	Variación [\$/ton] respecto a CA30
CAC CA20 SBVS	\$ 36 715 123	-10%	\$ 30 903	12,85%
CAC CA20 SBVH	\$ 31 956 045	-22%	\$ 27 522	0,50%
CAC CA20 BVS	\$ 36 320 337	-11%	\$ 30 903	12,85%
CAC CA20 BVH	\$ 34 118 861	-17%	\$ 27 522	0,50%
CAC CA20 3M	\$ 42 366 841	3%	\$ 33 069	20,76%
CAC CA20 NFU	\$ 31 683 566	-23%	\$ 27 298	-0,31%
ECSE MTE	\$ 35 406 930	-14%	\$ 24 970	-8,81%
CAC D19 CA30	\$ 41 018 354	0%	\$ 27 384	0,00%
CAC D19 AM3	\$ 39 675 976	-3%	\$ 29 455	7,56%
CAC D19 AAMP	\$ 30 309 592	-26%	\$ 29 802	8,83%

La Figura 53 muestra en forma de gráfico de barra los resultados obtenidos.

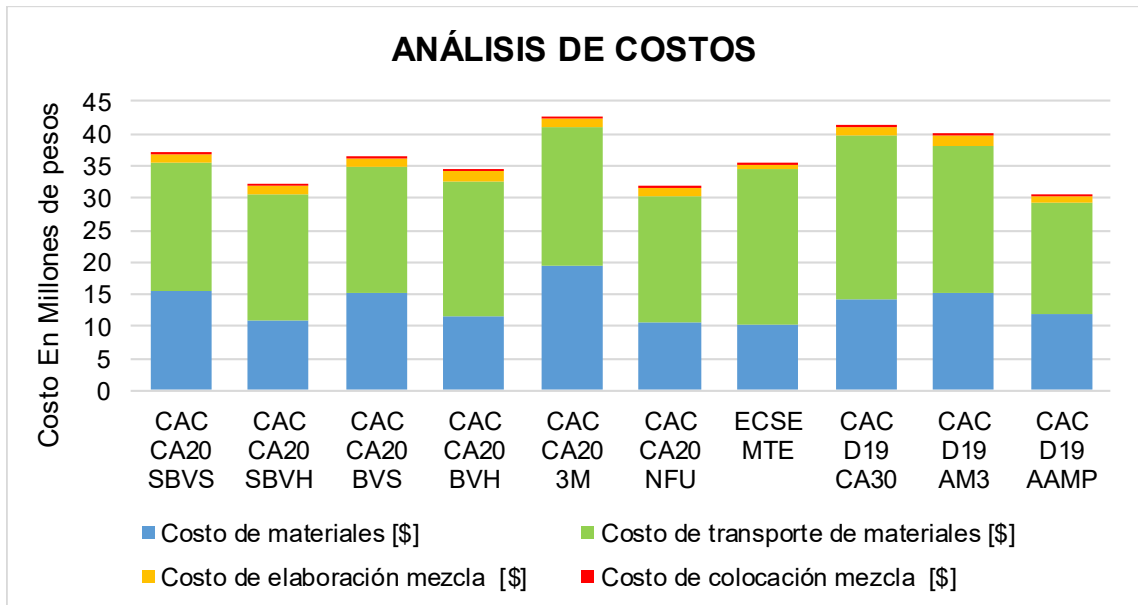


Figura 53 - Resultados de costos

Se observa que:

- La alternativa de 1 km base asfáltica con mezcla 3M es la más costosa de todas, siendo un 3% más cara que aquella con mezcla convencional. Esto se debe al elevado costo del procesamiento del plástico, y a las grandes cantidades que involucra.

- Las demás alternativas son menos costosas que aquella con mezcla convencional, con los porcentajes de diferencia de la Tabla 33. Se destaca la mezcla SBVS con una reducción de costos del 22% y la mezcla NFU con un 23%, ambos valores asociados a la reducción de espesores. La mezcla AAMP es la que logra las mayores reducciones (26%), también a causa de los menores espesores.
- Debido a que el estudio depende fuertemente de los espesores, se incluye en la Tabla 33 el costo por tonelada de cada mezcla. Allí se evidencia que las mezclas NFU, BVH y SBVH tienen costos muy similares a la convencional, mientras que SBVS y BVS son un 13% más caras a causa de la cantidad de plásticos que llevan y el pelletizado de los mismos. Las mezclas AM3 y AAMP son un 8% y 9% más caras, respectivamente, debido a la incorporación de polímeros. La mezcla 3M presenta un costo un 21% mayor que la CA30 por de la gran cantidad de plásticos que lleva y los procesos de pelletizado y posterior micronizado. Finalmente, la mezcla MTE es un 9% más barata a causa del empleo de emulsión asfáltica y los menores consumos energéticos que conlleva su elaboración.
- Se observa que el costo del transporte representa, en promedio, el 70% del costo total. Por ello, se incorpora la Figura 54 en la que se excluye el mismo. Cabe aclarar que no se observan cambios en las tendencias anteriores.

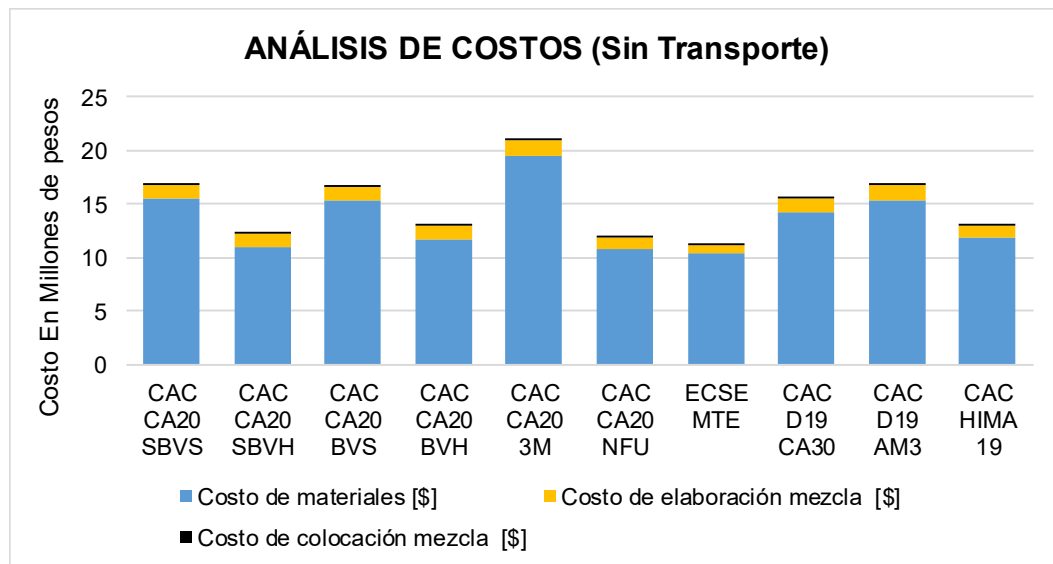


Figura 54 - Resultados de costos, excluyendo el transporte.

También se puede notar que el costo de la etapa de construcción resulta insignificante. Esto se debe a que sólo se ha tenido en cuenta el costo del combustible que usan los equipos. No se han incluido los costos asociados a mano de obra, amortización de equipos, reparaciones y repuestos, etc. Se estima

costos asociados a mano de obra, amortización de equipos, reparaciones y repuestos, etc. Se estima que si se tienen en cuenta los costos mencionados, las incidencias de los distintos ítems serían las indicadas en la Tabla 34.

Tabla 34 – Incidencia estimada de los diferentes ítems en el costo total.

Ítem	Incidencia [%]
Materiales	28
Mano de Obra	7
Transporte	41
Amortización	7
Reparaciones y Repuestos	3
Combustibles, Energía y Lubricantes	14

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Figura 55 muestra la diferencia en % en términos económicos y ambientales de las distintas mezclas asfálticas respecto a la mezcla convencional CA30.

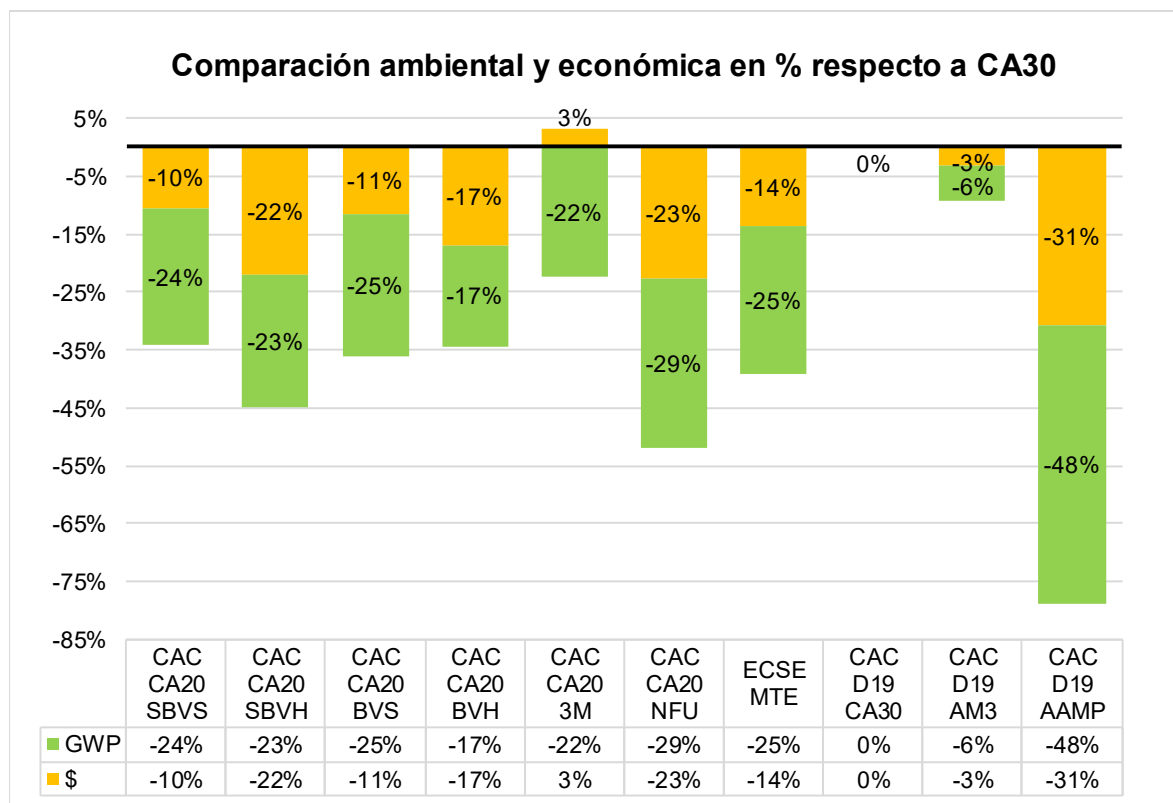


Figura 55 - Comparación en términos económicos y ambientales, en % respecto a la mezcla convencional.

Se añade en la Tabla 35 un ranking de las diferentes mezclas considerando el criterio ambiental, el criterio económico y la combinación de ambos. Se aclara el ranking combinado se basa en la consideración de que ambos criterios, ambiental y económico, tienen el mismo peso, es decir, son igualmente importantes. Esto se expresa con un factor de ponderación FP del 50%. En caso de que en los años venideros surjan leyes o disposiciones gubernamentales que premien el empleo de materiales reciclados (o castiguen su no utilización) se le dará mayor importancia al criterio ambiental, modificando el ranking establecido. A modo de ejemplo, se incorpora el ranking de la Tabla 36, el cual considera una mayor importancia del criterio ambiental (FP=80%).

Tabla 35 - Ranking de mezclas a igualdad de importancia entre criterios económico y ambiental

Nº	AMBIENTAL		ECONOMICO		COMBINADO (FP 50-50)	
1	CAC D19 AAMP	-47%	CAC D19 AAMP	-26%	CAC D19 AAMP	-37%
2	CAC CA20 NFU	-29%	CAC CA20 NFU	-23%	CAC CA20 NFU	-26%
3	ECSE MTE	-25%	CAC CA20 SBVH	-22%	CAC CA20 SBVH	-22%
4	CAC CA20 BVS	-25%	CAC CA20 BVH	-17%	ECSE MTE	-20%
5	CAC CA20 SBVS	-24%	ECSE MTE	-14%	CAC CA20 BVS	-18%
6	CAC CA20 SBVH	-23%	CAC CA20 BVS	-11%	CAC CA20 BVH	-17%
7	CAC CA20 3M	-22%	CAC CA20 SBVS	-10%	CAC CA20 SBVS	-17%
8	CAC CA20 BVH	-17%	CAC D19 AM3	-3%	CAC CA20 3M	-10%
9	CAC D19 AM3	-6%	CAC D19 CA30	0%	CAC D19 AM3	-5%
10	CAC D19 CA30	0%	CAC CA20 3M	3%	CAC D19 CA30	0%

Tabla 36 - Ranking de mezclas a mayor importancia de criterio ambiental sobre económico.

Nº	AMBIENTAL		ECONOMICO		COMBINADO (FP 80-20)	
1	CAC D19 AAMP	-47%	CAC D19 AAMP	-26%	CAC D19 AAMP	-30%
2	CAC CA20 NFU	-29%	CAC CA20 NFU	-23%	CAC CA20 NFU	-24%
3	ECSE MTE	-25%	CAC CA20 SBVH	-22%	CAC CA20 SBVH	-22%
4	CAC CA20 BVS	-25%	CAC CA20 BVH	-17%	CAC CA20 BVH	-17%
5	CAC CA20 SBVS	-24%	ECSE MTE	-14%	ECSE MTE	-16%
6	CAC CA20 SBVH	-23%	CAC CA20 BVS	-11%	CAC CA20 BVS	-14%
7	CAC CA20 3M	-22%	CAC CA20 SBVS	-10%	CAC CA20 SBVS	-13%
8	CAC CA20 BVH	-17%	CAC D19 AM3	-3%	CAC D19 AM3	-4%
9	CAC D19 AM3	-6%	CAC D19 CA30	0%	CAC CA20 3M	-2%
10	CAC D19 CA30	0%	CAC CA20 3M	3%	CAC D19 CA30	0%

Se concluye que las mejores mezclas (AAMP, NFU, SBVH) son aquellas con las que se han logrado menores espesores de base asfáltica, reduciendo el empleo de materiales vírgenes y las emisiones asociadas a transporte, elaboración y colocación de mezclas. En general, se emplean menos recursos. Cabe destacar, por otro lado, que las bondades de la mezcla MTE radican en los menores consumos energéticos asociados a su elaboración y en el relativamente bajo costo de la emulsión asfáltica.

En base a los resultados obtenidos, se concluye que los criterios a seguir para arribar a una reducción de impactos ambientales, sin descuidar el criterio económico, son:

- Mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas para lograr menores espesores estructurales y mayor durabilidad.
- Reducir la energía empleada en la etapa de elaboración de la mezcla.
- Incorporar residuos de otros procesos, con el menor procesamiento posible.

9. CONCLUSIONES

La autora Gómez Ore [52] incluye en su tesis de grado una frase de J. Gregory [53] que resulta interesante remarcar:

“Lograr una infraestructura vial sustentable es posible, a través de un diseño de alto desempeño, la reducción de costos y la reducción de impactos ambientales. Se debe equilibrar estos tres factores para presentar una opción sustentable en todos los sentidos, que se pueda llevar a la práctica” (Gregory, J. 2017).

Argentina, en un contexto de post-pandemia COVID-19, vive tiempos de escasez de recursos económicos destinados a la obra pública y una creciente necesidad de infraestructura. Por lo tanto, es más importante que nunca lograr soluciones sostenibles a largo plazo, a partir de considerar criterios técnicos, económicos y ambientales. Para ello, los profesionales de la ingeniería deben valerse de herramientas que les permitan hacerlo. Tales herramientas pueden ser el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y el Análisis del Costo de Ciclo de Vida (ACCV, o en inglés, *Life Cycle Cost Analysis* LCCA). Esta última no se ha empleado en el presente estudio, pero constituye una metodología que podría haberse aplicado en el apartado (7).

El ACV permite la evaluación de impactos ambientales a lo largo de toda la vida de un producto o servicio, mientras que el ACCV permite determinar de manera estructurada las implicancias económicas de cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto o servicio, siendo un proceso iterativo para la estimación, planeación y monitoreo de costos. Ambas herramientas se complementan para dar lugar a una solución equilibrada e integral.

En base a estas consideraciones, en el presente trabajo se plantean 10 alternativas de bases asfálticas, 7 de las cuales incorporan materiales que las hacen ambientalmente amigables (plástico reciclado, caucho reciclado, mezclas templadas) y 3 incluyen mezclas de control (convencional y con asfalto modificado con polímeros). Para hacerlas comparables, se parte de una misma vida útil de 15 años y se calculan los espesores que cada base requiere, dentro de un paquete estructural tipo común para todas. Partiendo entonces de la hipótesis de que todos los paquetes estructurales están en igualdad de condiciones técnicas se pasa a analizar los aspectos ambientales (ACV) y económicos.

En base a los resultados obtenidos y analizados en el apartado (8) se concluye que **la mejor solución técnica-económica-ambiental** la constituye la base asfáltica con asfalto altamente modificado con polímeros (**AAMP**). El elevado costo del ligante se ve contrarrestado por los delgados espesores que se logran (menor uso de materiales) y ahorro económico que esto conlleva. Además de impactar positivamente en el aspecto económico, también lo hace en el ambiental, dado que los menores espesores se asocian con un menor empleo de recursos (materia prima, energía) lo que conduce a una reducción impactos. Mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas, haciéndolas más resistentes y durables en el tiempo, tiene consecuencias positivas tanto ambiental como técnica y económicamente. Resultaría interesante entonces incursionar en la tecnología de materiales, incentivar la búsqueda de mejores soluciones en ese ámbito.

La incorporación de materiales reciclados en las mezclas asfálticas trae resultados positivos. La compatibilidad del caucho y el plástico con el asfalto hacen que la introducción de estos residuos en las mezclas sea una alternativa viable y las propiedades de las mezclas se vean mejoradas. Esto conduce a los mismos beneficios mencionados anteriormente para AAMP, pero en menor magnitud. La particularidad de las mezclas con residuos radica en que, al incluirlos en las mezclas, se evita su proliferación en vertederos u otros tipos de disposición final que son nocivos para el ambiente. Para que el empleo de materiales reciclados sea más beneficioso respecto a otras soluciones, debe estar acompañado de políticas públicas y normativas que incentiven su uso. Hoy en día, no existen en Argentina tales disposiciones.

Según un estudio realizado por Mario R. Jair en 2020 [54], el mercado del asfalto en Argentina durante la última década ha sido en el orden de las 500 mil toneladas anuales. Si se empleasen en todos los casos las mezclas con residuos, se estarían reciclando entre 10 y 15 mil toneladas anuales de plástico, o bien, alrededor de 2 mil toneladas de caucho. En Argentina, se generan anualmente 70.000 toneladas de desechos plásticos provenientes de silobolsas y bidones de fitosanitarios, por lo que, si los mismos se incorporan en el pavimento, se lograría reciclar únicamente un 20%. Con respecto al caucho, se generan 130 mil toneladas anuales de NFU, y lo que es susceptible de ser incorporado en mezclas representa el 1,5%. En base a esto, se concluye que es necesario encontrar la manera de incorporar una mayor cantidad de residuos en las mezclas, pero sin perjudicar sus propiedades, y tratando de tener el menor procesamiento posible de los desechos. Actualmente, la discusión se centra en si realmente vale la pena la incorporación de residuos en los pavimentos o no.

Según Huang [6] el objetivo de aplicar un ACV a la industria vial no es necesariamente argumentar a favor del uso de materiales reciclados en cualquier circunstancia posible. Más bien, proporciona una revisión objetiva y completa de los muchos impactos ambientales de los pavimentos asfálticos, desde la extracción y transporte de materiales, hasta la fabricación, colocación y disposición del mismo. El

objetivo es reducir los impactos ambientales a partir de identificar las etapas y aspectos “críticos”, que configuran las áreas prioritarias sobre las que actuar. Además, Huang reconoce que el resultado del ACV por sí solo no toma la decisión final, ya que esa evaluación ambiental debe ser evaluada junto con los resultados de los estudios técnicos y económicos.

Para finalizar, se incluyen algunos comentarios sobre las metodologías e hipótesis adoptadas a lo largo del trabajo.

En primer lugar, queda pendiente, para un estudio futuro, la realización del ensayo a fatiga 4PBT de las mezclas con plástico y caucho reciclado para obtener la ley de falla por fatiga real y optimizar el modelo. También, hubiera sido interesante evaluar en el presente estudio mezclas con diferentes contenidos de RAP.

En segundo lugar, hubiera sido interesante realizar un análisis estructural con la herramienta *Deterioro* del software BackViDe, el cual considera la variación del módulo dinámico E^* de las distintas capas de pavimento a lo largo de la vida de la estructura. El comentario se justifica en que el uso de materiales reciclados en pavimentos asfálticos es relativamente nuevo en la práctica, y se cuenta con información limitada sobre el comportamiento de los mismos a lo largo del tiempo. Esto impacta en la frecuencia con la que el pavimento necesita ser reparado. Se destaca entonces la importancia de incorporar las etapas de mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos en el ACV. La incertidumbre en el comportamiento futuro de los nuevos materiales explica la dificultad de predecir la vida útil del pavimento, un parámetro clave para el ACV, que impacta directamente en los resultados del mismo.

En tercer lugar, se añade que lamentablemente no se cuenta con inventarios ni bases de datos de Argentina. Por lo tanto, han sido empleadas las de otros países. Esto da como resultado que el valor absoluto de impacto ambiental no sea representativo de lo que sucede en el país, pero los valores que surgen del análisis comparativo si son válidos.

Por último, se destaca que el impacto ambiental de los pavimentos asfálticos es extremadamente sensible a las distancias de transporte de los materiales. Se estima que formas alternativas al transporte carretero, como el transporte por trenes o barcazas, reducirían un 85% y 89% las emisiones de gases de efecto invernadero, respectivamente [55].

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Comisión Permanente del Asfalto. (2015). PLIEGO DE ESPECIFICACIONES TECNICAS GENERALES PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE GRUESAS.*
- [2] *Orobio, A., & Gil, J. (s.f.). ANALISIS DE COSTOS DE CONSTRUCCIÓN ASOCIADOS AL DISEÑO RACIONAL DE PAVIMENTOS CON DIFERENTES MODELOS DE FATIGA.*
- [3] *Cooper, S. B. (Febrero de 2012). PERFORMANCE AND COST EFFECTIVENESS OF SUSTAINABLE TECHNOLOGIES IN FLEXIBLE PAVEMENTS USING THE MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE. Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 24, Issue 2 ISSN (print): 0899-1561 | ISSN (online): 1943-5533.*
- [4] *Garcia de Abreu Lima, G. e. (2019). CONSIDERAÇÕES SOBRE CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RECICLADOS COM CIMENTO.*
- [5] *Zapata Ferrero, I., Riviera, J., & Botasso, G. (2021). ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA EN PAVIMENTOS: ACTUALIDAD Y PERSPECTIVA. Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.*
- [6] *Huang, Y. (2007). LIFE CYCLE ASSESSMENT OF USE OF RECYCLED MATERIALS IN ASPHALT PAVEMENTS. School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University.*
- [7] *Rangelov, M., & Sivaneswaran, N. (2021). LIFE-CYCLE ASSESSMENT OF ASPHALT PAVEMENTS WITH RECYCLED POST-CONSUMER POLYETHYLENE. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board.*
- [8] *Anshassi, M., & Townsend, T. (2021). REVIEWING THE UNDERLYING ASSUMPTIONS IN WASTE LCA MODELS TO IDENTIFY IMPACTS ON WASTE MANAGEMENT DECISION MAKING. Journal of Cleaner Production 313 (2021) 127913. Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida.*
- [9] *C. A. Bernardo, Carla L. Simões and Lígia M. Costa. (2016). ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC LIFE CYCLE ANALYSIS OF PLASTIC WASTE MANAGEMENT OPTIONS. A REVIEW. AIP Conference Proceedings 1779, 140001 (2016); <https://doi.org/10.1063/1.4965581>.*
- [10] *Arce-Bastias, F. (2022). BENEFICIOS AMBIENTALES DEL RECICLAJE DE RESIDUOS PLÁSTICOS POSCONSUMO PARA LA PRODUCCIÓN DE POSTES EN MENDOZA, ARGENTINA. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 25(Supl.1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.nSupl.1.2022.2145>*
- [11] *Bartolozzi, I., Antunes, I., & Rizzi, F. (2012). THE ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF ASPHALT RUBBER: LIFE CYCLE ASSESSMENT. Pisa, Italia.*
- [12] *Farina, A., Zanett, M., Santagata, E., Blengini, G., & Lanotte, M. (s.f.). LIFE CYCLE ASSESSMENT OF ROAD PAVEMENTS CONTAINING CRUMB RUBBER FROM END-OF-LIFE TIRES. Torino, Italia.*
- [13] *Farina, A., Zanetti, M., Santagata, E., & Blengini, G. (2016). LIFE CYCLE ASSESSMENT APPLIED TO BITUMINOUS MIXTURES CONTAINING RECYCLED MATERIALS: CRUMB RUBBER AND RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT. Resources, Conservation and Recycling 117 (2017) 204–212.*

- [14] Mithil Mazumder, Vedaraman Sriraman, Hyun Hwan Kim. (2016). QUANTIFYING THE ENVIRONMENTAL BURDENS OF THE HOT MIX ASPHALT (HMA) PAVEMENTS AND THE PRODUCTION OF WARM MIX ASPHALT (WMA). *International Journal of Pavement Research and Technology* 9. Texas, EEUU.
- [15] Hui Ma, Zhigang Zhang ,Xia Zhao, and Shuang . (2019). A COMPARATIVE LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF WARM MIX ASPHALT (WMA) AND HOT MIX ASPHALT (HMA) PAVEMENT: A CASE STUDY IN CHINA. Chongqing, China.
- [16] Vialidad Nacional. *PLIEGO DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA CONCRETOS ASFÁLTICOS EN CALIENTE Y SEMICALIENTE DEL TIPO DENSOS*. (Edición 2017).
- [17] Angelone, S., Cauhape Casaux, M., Zorzutti, L., Balige, M., González, R., Vargas Martínez, M., & Lucci, G. (2019). *PROYECTO PASOS: PAVIMENTOS SOSTENIBLES. . PRIMER TRAMO EXPERIMENTAL CON PLÁSTICOS RECICLADOS*. México: XX - CILA.
- [18] Cauhapé Casaux, M., Angelone, S., & Martínez, F. (2016). *EVALUACIÓN DE LA POSIBILIDAD DE USO DE ENVASES PLÁSTICOS USADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS*. Informe Técnico. Convenio de colaboración, investigación y desarrollo conjunto IMAE -YPF.
- [19] Cauhapé Casaux, M., Abelli, R., Angelone, S., & Martínez, F. (2017). *EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON DISPERSIÓN DE CAUCHO CON BAJO CONSUMO ENERGÉTICO*. Medellín, Colombia: XIX - CILA.
- [20] Martínez, F., Cauhapé Casaux, M., Zorzutti, L., & Angelone, S. (2019). *DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES VISCO-ELASTICAS DE UNA MEZCLA TEMPLADA CON EMULSION ASFÁLTICA*. México: XX - CILA.
- [21] Norma IRAM 6596. . (Segunda edición: 30/10/2012). *ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS PARA USO VIAL*.
- [22] *Boletín Oficial del Estado*. (3 de Enero de 2015). 542 MEZCLAS BITUMINOSAS TIPO HORMIGÓN BITUMINOSO, Secc. III(Num 3), Pag. 801.
- [23] Weise, C., Werkmeister, S., Wellner, F., & Oeser, M. (2009). *DETERMINATION OF THE FATIGUE BEHAVIOUR OF ASPHALT BASE MIXES USING THE INDIRECT TENSILE AND THE 4 POINT BENDING TEST*. 2nd Workshop on Four Point Bending, Pais (ed.), © 2009. University of Minho. ISBN 978-972-8692-42-1
- [24] Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M. A., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, Á., & Indacoechea-Vega, I. (2016). *COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF ASPHALT CONCRETES MODIFIED BY DRY WAY WITH POLYMERIC WASTE*. *Construction and Building Materials*, 112.
- [25] Pagola, M., Giovanon, O., & Ramoneda, J. (s.f.). *ANÁLISIS DE LOS FACTORES DE DETERIORO DE CAMIÓN EN LA ZONA CENTRAL DE ARGENTINA*. Rosario.
- [26] Bianchi, A. R., & Cravero, S. A. (2010). *ATLAS CLIMÁTICO DIGITAL DE LA REPÚBLICA ARGENTINA*. INTA.
- [27] Pszczoła, M. (2014). *EQUIVALENT TEMPERATURE FOR DESIGN OF AIRPORT PAVEMENTS USING MECHANISTIC - EMPIRICAL METHODS*. Gdansk University of Technology.
- [28] ISO 14040:2006 - *Environmental management — Life cycle assessment —Principles and framework*.

- [29] ISO 14044:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.
- [30] US Department of Transportation - Federal Highway Administration. (Noviembre de 2021). LCA PAVE: A TOOL TO ASSESS ENVIRONMENTAL IMPACTS OF PAVEMENT MATERIAL AND DESIGN DECISIONS - UNDERLYING METHODOLOGY AND ASSUMPTIONS. Washington, DC., EEUU.
- [31] Cabaraban, M. T., Khire, M., & Alocilja, E. (2007). AEROBIC IN-VESSEL COMPOSTING VERSUS BIOREACTOR LANDFILLING USING LIFE CYCLE INVENTORY MODELS.
- [32] Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Su. (2019). MANUAL DE IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN LA CONSTRUCCIÓN.
- [33] Temren, Z., & Sönmez, İ. (2012). A STUDY ON ENERGY CONSUMPTION AND CARBON FOOTPRINT OF ASPHALT AND CONCRETE MIXTURES. Istanbul: 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress.
- [34] Gschösser, F. (2011). ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF ROAD CONSTRUCTIONS - LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SWISS ROAD PAVEMENTS AND AN ACCOMPANYING ANALYSIS OF CONSTRUCTION AND MAINTENANCE COSTS. Zurich, Suiza.
- [35] Van Bochove, G., Bolk, H., Poncelet, K., & Lecomte, M. (2012). LOWERING THE PRODUCTION TEMPERATURE OF ASPHALT WHILE INCORPORATING A HIGH PROPORTION OF RECYCLED MATERIAL. Holanda: 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th June 2012, Istanbul.
- [36] Cauhapé Casaux, M. (2015). TESIS Estudio de Impacto Ambiental: Análisis de Ciclo de Vida. Rosario, Argentina.
- [37] Mukherjee, A. (2016). Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures in Support of an Environmental Product Declaration. Michigan Technological University, EEUU.
- [38] Riekstins, A., Haritonovs, V., & Straupe, V. (2022). ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF CRUMB RUBBER MODIFIED ASPHALT. Riga, Letonia: Construction and Building Materials 335 (2022) 127468.
- [39] Oreto, C., Russo, F., Veropalumbo, R., Viscione, N., Biancardo, S. A., & Dell'Acqua, G. (2021). LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SUSTAINABLE ASPHALT PAVEMENT SOLUTIONS INVOLVING RECYCLED AGGREGATES AND POLYMERS. Italia. <https://doi.org/10.3390/ma14143867>.
- [40] MILACHOWSKI, C., STENGEL, T., & GEHLEN, C. (2011). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UNA CARRETERA DURANTE LAS ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN Y USO. Munich, Alemania. Revista CARRETERAS - Número 179.
- [41] García Casero, A. (2014). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES CON ÁRIDO RECICLADO. Santander, Cantabria, España.
- [42] Mazumder, M., Sriraman, V., Kim, H., & Lee, S.-J. (2016). QUANTIFYING THE ENVIRONMENTAL BURDENS OF THE HOT MIX ASPHALT (HMA) PAVEMENTS AND THE PRODUCTION OF WARM MIX ASPHALT (WMA). Texas, EEUU: International Journal of Pavement Research and Technology 9 (2016) 190–201.

- [43] Ma, H., Zhang, Z., Zhao, X., & Wu, S. (2019). A COMPARATIVE LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF WARM MIX ASPHALT (WMA) AND HOT MIX ASPHALT (HMA) PAVEMENT: A CASE STUDY IN CHINA. *Hindawi; Advances in Civil Engineering Volume 2019, Article ID 9391857, 12 pages* <https://doi.org/10.1155/2019/9391857>.
- [44] Sánchez Navarro, L. (2018). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS MODIFICADAS CON RAP. *Victoria de Durango, Durango, México*.
- [45] Capuano, L., Magatti, G., & Mantecca, P. (2021). RIFIUTI PLASTICI COME MATERIA PRIMA PER PAVIMENTAZIONI STRADALI INNOVATIVE: UNA VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA. *Ingegneria dell'Ambiente Vol. 8 n. 2/2021. Milan, Italia: dx.doi.org/10.32024/ida.v8i2.342*.
- [46] Instituto Superior del Medio Ambiente - SimaPro: Herramienta de ACV. (s.f.). Obtenido de <https://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/simapro-herramienta-de-analisis-de-ciclo-de-vida/>
- [47] Instituto Superior del Medio Ambiente - GaBi: Herramienta de ACV. (s.f.). Obtenido de <https://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/gabi-herramienta-de-acv/>
- [48] Santos, J., Keijzer, E., Thyagarajan, S., & Flintsch, G. (2017). COMPARISON OF LIFE-CYCLE ASSESSMENT TOOLS FOR ROAD PAVEMENT INFRASTRUCTURE. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*.
- [49] Imagen Extraída de la web: <https://www.openlca.org/>
- [50] Imagen Extraída de la hoja "Intro" del software.
- [51] Tisberger Ibañez, T. E. (2019/2020). LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PAVEMENTS THROUGH PALATE (Tesis de Grado).
- [52] Gómez Oré, P. (2018). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS URBANOS EN AREQUIPA APLICANDO LA METODOLOGÍA ISO 14040. *Arequipa, Perú*.
- [53] Gregory, J. (2017). Pavement-related research at the MIT Concrete Sustainability Hub. Extraído de: <https://cshub.mit.edu/pavements>
- [54] Jair, M. R. (2020). TENDENCIAS GLOBALES EN EL MERCADO DEL ASFALTO Y SUS IMPLICANCIAS EN ARGENTINA.
- [55] Center For Ports And Waterways & Texas A&M Transportation Institute. Houston, Texas (Enero, 2022). A MODAL COMPARISON OF DOMESTIC FREIGHT TRANSPORTATION EFFECTS ON THE GENERAL PUBLIC: 2001–2019. Prepared for NATIONAL WATERWAYS FOUNDATION.

ANEXO 1

A continuación, se presentan los resultados del análisis estructural de los pavimentos flexibles planteados en el trabajo. Se incluye:

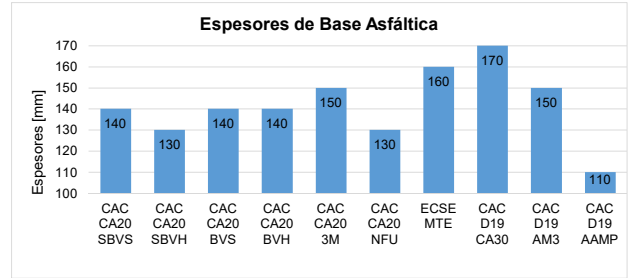
- Una tabla general donde se incorpora la información más relevante del análisis, junto con su gráfica asociada. Esta tabla incluye:
 - El espesor obtenido para cada base asfáltica.
 - El módulo dinámico del material.
 - La deformación específica a 10^6 ciclos.
 - La cantidad de ciclos admisibles hasta la falla.
 - El cociente entre cantidad de ciclos admisibles hasta la falla y el número estimado de ejes equivalentes en la vida útil de la estructura (15 años). Este número se busca que sea mayor que 1 pero cercano a este valor.

- Una serie de tablas que incluyen los resultados que arroja el software BackViDe. Se incorpora una tabla por cada una de las bases asfálticas. Las mismas incluyen la siguiente información relativa a cada una de las capas que conforman el paquete estructural tipo:
 - El espesor, el tipo de material y el modulo “elástico” del mismo (se trata del módulo dinámico o del módulo resiliente, según se trate de una capa ligada o no ligada, respectivamente.)
 - La deformación de tracción ϵ_t o la de compresión ϵ_z (llamada también ϵ_p) según se trate de capas ligadas (fallan por fatiga) o no ligadas (fallan por ahuellamiento), respectivamente.
 - El número de ciclos admisibles hasta la falla. El menor de estos valores indica en qué capa del paquete se produce la falla estructural.

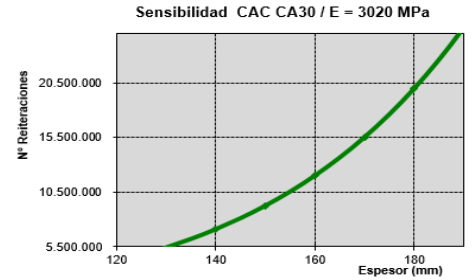
- Una serie de gráficas de sensibilidad que acompañan a cada tabla. Cada gráfica muestra, para un determinado valor de módulo dinámico de la base asfáltica (modulo a 27°C y 10Hz), cómo varía el número de ciclos admisibles hasta la falla según el espeso de la base. Se puede observar allí cuantos ciclos de carga resistiría la estructura si se decide modificar el espesor de la base asfáltica.

ANEXO 1

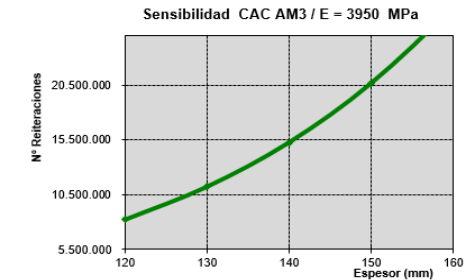
Material Base Asfáltica	E [MPa]	Espesor [mm]	et [10 ⁻⁶]	Nadm	Nadm/ESALS	ESALS
1 CAC CA20 SBVS	4950	140	-127	16 676 374	1,12	14 900 354
2 CAC CA20 SBVH	4820	130	-138	14 500 944	0,97	
3 CAC CA20 BVS	5380	140	-122	16 062 044	1,08	
4 CAC CA20 BVH	6530	140	-109	19 144 426	1,28	
5 CAC CA20 3M	6720	150	-100	17 279 832	1,16	
6 CAC CA20 NFU	4150	130	-150	18 979 966	1,27	
7 ECSE MTE	2300	160	-171	15 063 289	1,01	
8 CAC D19 CA30	3020	170	-139	15 501 593	1,04	
9 CAC D19 AM3	6720	150	-100	17 283 522	1,16	
10 CAC D19 AAMP	4650	110	-161	16 675 577	1,12	



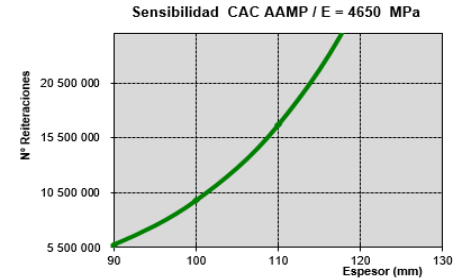
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[just]	Tensión	Nadm.	Ez[just]	Nadm.
1	Asf	30	4560	54		9 980 018 688		
2	CA30	170	3020	-139		15 501 593		
3	Mr	100	200				267	512 685 280
3	Mr	100	170				247	891 264 960
4	Mr	100	132				237	232 271 728
4	Mr	100	134				191	534 266 400
5	Mr	100	117				173	457 103 488
5	Mr	100	122				144	919 234 112
6	Mr	200	94				146	345 308 032
6	Mr	300	110				99	1 537 247 744
6	Mr	400	130				63	8 761 846 784
6	Mr	0	143				41	9 980 018 688



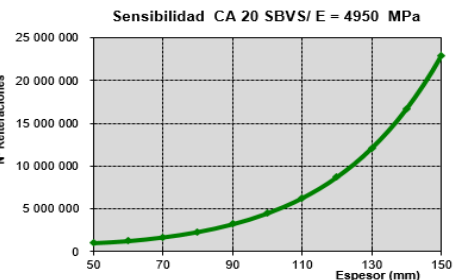
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[just]	Tensión	Nadm.	Ez[just]	Nadm.
1	Asf	30	4560	60		9 980 018 688		
2	AM3	150	6720	-100		17 283 522		
3	Mr	100	203				211	1 338 207 104
3	Mr	100	174				207	1 784 857 472
4	Mr	100	134				207	389 648 096
4	Mr	100	136				172	793 934 528
5	Mr	100	119				159	629 913 920
5	Mr	100	124				135	1 186 398 464
6	Mr	200	96				138	431 326 400
6	Mr	300	111				96	1 766 141 568
6	Mr	400	130				62	9 268 358 144
6	Mr	0	143				41	9 980 018 688



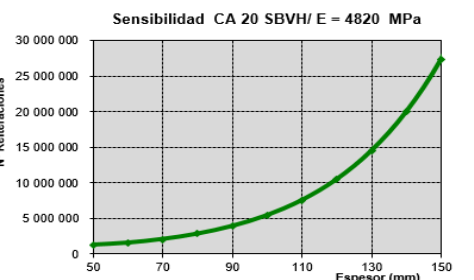
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[just]	Tensión	Nadm.	Ez[just]	Nadm.
1	Asf	30	4560	76		9 980 018 688		
2	AAMP	110	4650	-161		16 675 577		
3	Mr	100	230				299	258 368 144
3	Mr	100	171				331	275 291 744
4	Mr	100	128				325	66 894 608
4	Mr	100	127				262	154 128 400
5	Mr	100	109				237	135 084 144
5	Mr	100	113				194	290 533 568
6	Mr	200	86				195	112 226 400
6	Mr	300	101				127	599 664 512
6	Mr	400	122				76	4 370 705 920
6	Mr	0	135				48	9 980 018 688



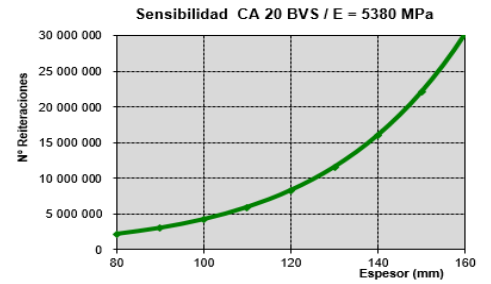
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[just]	Tensión	Nadm.	Ez[just]	Nadm.
1	Asf	30	4560	66		9 980 018 688		
2	SBVS	140	4950	-127		16 676 374		
3	Mr	100	210				252	607 784 640
3	Mr	100	172				253	810 360 320
4	Mr	100	131				249	188 360 768
4	Mr	100	132				204	410 088 160
5	Mr	100	115				187	341 062 976
5	Mr	100	120				156	680 623 936
6	Mr	200	92				158	253 983 312
6	Mr	300	107				107	1 161 050 240
6	Mr	400	127				67	7 046 194 688
6	Mr	0	140				43	9 980 018 688



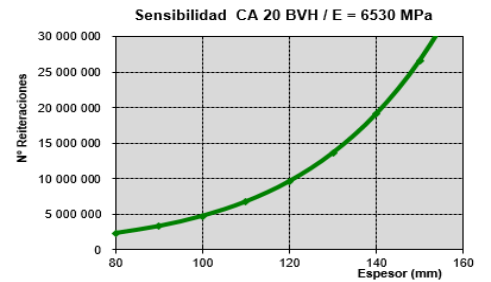
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[just]	Tensión	Nadm.	Ez[just]	Nadm.
1	Asf	30	4560	69		9 980 018 688		
2	SBVH	130	4820	-138		14 500 944		
3	Mr	100	216				268	453 600 928
3	Mr	100	172				277	567 354 880
4	Mr	100	130				272	133 323 120
4	Mr	100	130				222	295 710 176
5	Mr	100	113				202	250 033 728
5	Mr	100	118				168	511 198 912
6	Mr	200	90				170	192 836 912
6	Mr	300	105				113	928 338 048
6	Mr	400	125				70	6 002 752 512
6	Mr	0	138				45	9 980 018 688



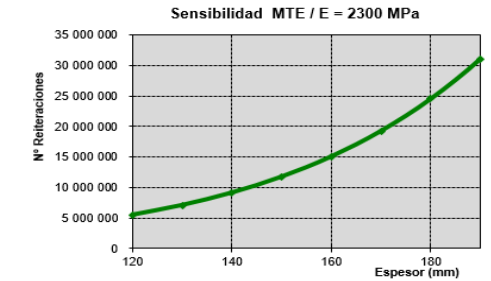
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	30	4560	65		9 980 018 688		
2	BVS	140	5380	-122		16 062 044		
3	Mr	100	210				244	701 380 928
3	Mr	100	172				245	918 306 944
4	Mr	100	132				243	209 370 640
4	Mr	100	133				199	449 286 752
5	Mr	100	115				183	370 071 072
5	Mr	100	120				153	731 174 784
6	Mr	200	92				156	271 553 152
6	Mr	300	107				105	1 221 974 400
6	Mr	400	127				66	7 286 509 056
6	Mr	0	140				43	9 980 018 688



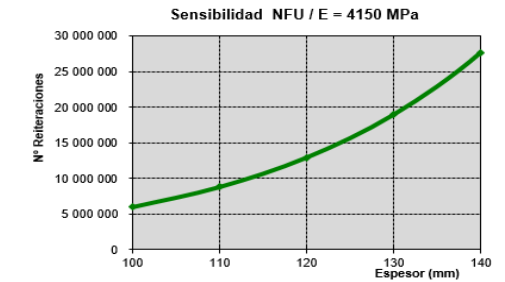
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	30	4560	64		9 980 018 688		
2	BVH	140	6530	-109		19 144 426		
3	Mr	100	209				226	983 020 800
3	Mr	100	173				227	1 236 804 736
4	Mr	100	133				227	270 278 880
4	Mr	100	134				188	560 904 832
5	Mr	100	117				174	451 821 664
5	Mr	100	122				146	871 868 736
6	Mr	200	94				149	320 208 416
6	Mr	300	108				102	1 387 299 968
6	Mr	400	128				65	7 917 452 288
6	Mr	0	141				43	9 980 018 688



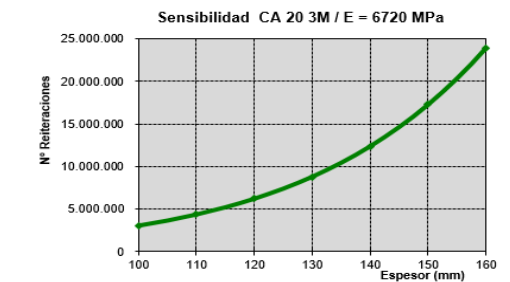
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	30	4560	51		9 980 018 688		
2	MTE	160	2300	-171		15 063 289		
3	Mr	100	205				311	261 778 768
3	Mr	100	168				291	461 912 768
4	Mr	100	130				275	129 307 568
4	Mr	100	131				218	316 027 360
5	Mr	100	114				196	282 494 496
5	Mr	100	119				161	597 013 632
6	Mr	200	91				163	229 706 928
6	Mr	300	107				108	1 116 203 136
6	Mr	400	127				67	7 093 413 376
6	Mr	0	141				43	9 980 018 688



Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	30	4560	69		9 980 018 688		
2	NFU	130	4150	-150		18 979 966		
3	Mr	100	217				284	354 670 624
3	Mr	100	171				291	459 770 784
4	Mr	100	130				285	112 320 048
4	Mr	100	130				230	255 621 984
5	Mr	100	112				209	219 935 424
5	Mr	100	117				173	457 407 840
6	Mr	200	89				174	173 998 992
6	Mr	300	104				115	859 782 912
6	Mr	400	125				71	5 708 417 024
6	Mr	0	138				45	9 980 018 688



Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	30	4560	60		9 980 018 688		
2	CA20 3M	150	6720	-100		17 279 832		
3	Mr	100	203				211	1 338 118 912
3	Mr	100	174				207	1 784 787 584
4	Mr	100	134				207	389 615 648
4	Mr	100	136				172	793 848 384
5	Mr	100	119				159	629 831 104
5	Mr	100	124				135	1 186 223 104
6	Mr	200	96				138	431 256 928
6	Mr	300	111				96	1 765 817 344
6	Mr	400	130				62	9 266 758 656
6	Mr	0	143				41	9 980 018 688



ANEXO 2

El software LCA_Pave utiliza la metodología de evaluación de impactos ambientales TRACI 2.1 (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts) desarrollada por la US Environmental Protection Agency's (EPA). Esta herramienta tiene la función de:

- Determinar cuáles son los impactos ambientales más relevantes y en base a ellos establecer las categorías de impacto a evaluar. Escoger una unidad adecuada para cuantificar el impacto (indicador de categoría).
- Correlacionar las emisiones de gases, el vertido de compuestos tóxicos, la generación de residuos y las demás consecuencias del ciclo de vida de un producto o servicio con las categorías de impacto a las cuales contribuyen. Es decir, determinar qué especie contribuye a qué impacto.
- Transformar todas las especies a una especie equivalente, la representativa del impacto (indicador de categoría). Para ello se requiere determinar cuánto contribuye cada especie a cada impacto. Una vez definido esto, se elaboran los factores de caracterización, que son los coeficientes que se utilizan para llevar una determinada especie al indicador de categoría de manera que se genere un impacto equivalente.

La Figura 1, Figura 2 y Figura 3 muestran capturas de pantalla del software OpenLCA, las cuales indican cómo la metodología TRACI 2.1 considera las distintas categorías de impacto con sus indicadores de categoría, qué especies contribuyen a qué impacto y cuáles son los factores de caracterización de cada uno de ellas para cada impacto.

Las tablas incorporadas al final del documento muestran la información introducida en el software LCA_Pave y empleada para el ACV de las mezclas asfálticas con materiales sustentables.

Name	Reference unit
☰ Acidification	kg SO2 eq
☰ Carcinogenics	CTUh
☰ Ecotoxicity	CTUe
☰ Eutrophication	kg N eq
☰ Fossil fuel depletion	MJ surplus
☰ Global warming	kg CO2 eq
☰ Non carcinogenics	CTUh
☰ Ozone depletion	kg CFC-11 eq
☰ Respiratory effects	kg PM2.5 eq
☰ Smog	kg O3 eq

Figura 1 – Categorías de impacto e indicadores de categoría para la metodología TRACI 2.1.
Fuente: OpenLCA

Impact factors: TRACI 2.1

Impact factors 1.23

Impact category: Acidification

Flow	Category	Flow property	Factor	Unit	Uncertainty
☒ Nitrogen oxides, SK	Emission to air/high population...	Mass	0.7	kg SO2 eq/kg	none
☒ Nitrogen oxides, SK	Emission to air/low population ...	Mass	0.7	kg SO2 eq/kg	none
☒ Nitrogen oxides, SK	Emission to air/low population ...	Mass	0.7	kg SO2 eq/kg	none
☒ Nitrogen oxides, SK	Emission to air/lower stratosph...	Mass	0.7	kg SO2 eq/kg	none
☒ Nitrogen oxides, SK	Emission to air/unspecified	Mass	0.7	kg SO2 eq/kg	none
☒ Nitrogen oxides, UA	Emission to air/high population...	Mass	0.7	kg SO2 eq/kg	none
☒ Nitrogen oxides, UA	Emission to air/low population ...	Mass	0.7	kg SO2 eq/kg	none
☒ Nitrogen oxides, UA	Emission to air/low population ...	Mass	0.7	kg SO2 eq/kg	none
☒ Nitrogen oxides, UA	Emission to air/lower stratosph...	Mass	0.7	kg SO2 eq/kg	none
☒ Nitrogen oxides, UA	Emission to air/unspecified	Mass	0.7	kg SO2 eq/kg	none
☒ Phosphoric acid	Emission to air/high population...	Mass	0.98	kg SO2 eq/kg	none
☒ Phosphoric acid	Emission to air/low population ...	Mass	0.98	kg SO2 eq/kg	none
☒ Phosphoric acid	Emission to air/low population ...	Mass	0.98	kg SO2 eq/kg	none
☒ Phosphoric acid	Emission to air/lower stratosph...	Mass	0.98	kg SO2 eq/kg	none
☒ Phosphoric acid	Emission to air/unspecified	Mass	0.98	kg SO2 eq/kg	none
☒ Sulfur dioxide	Emission to air/high population...	Mass	1.0	kg SO2 eq/kg	none
☒ Sulfur dioxide	Emission to air/low population ...	Mass	1.0	kg SO2 eq/kg	none
☒ Sulfur dioxide	Emission to air/low population ...	Mass	1.0	kg SO2 eq/kg	none
☒ Sulfur dioxide	Emission to air/lower stratosph...	Mass	1.0	kg SO2 eq/kg	none
☒ Sulfur dioxide	Emission to air/unspecified	Mass	1.0	kg SO2 eq/kg	none
☒ Sulfur dioxide, AL	Emission to air/low population ...	Mass	1.0	kg SO2 eq/kg	none

Figura 2 – Especies contribuyentes a la categoría de impacto “Acidificación” y sus factores de caracterización para llevarlos a la unidad indicadora de categoría.

Impact factors: TRACI 2.1

Impact factors 1.23

Impact category: Global warming

Flow	Category	Flow property	Factor	Unit	Uncertainty
☒ Propane, 1,3-dichloro-1,1,2,2,...	Emission to air/low population ...	Mass	595.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, 1,3-dichloro-1,1,2,2,...	Emission to air/lower stratosph...	Mass	595.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, 1,3-dichloro-1,1,2,2,...	Emission to air/unspecified	Mass	595.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, 3,3-dichloro-1,1,1,2,...	Emission to air/high population...	Mass	122.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, 3,3-dichloro-1,1,1,2,...	Emission to air/low population ...	Mass	122.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, 3,3-dichloro-1,1,1,2,...	Emission to air/low population ...	Mass	122.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, 3,3-dichloro-1,1,1,2,...	Emission to air/lower stratosph...	Mass	122.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, 3,3-dichloro-1,1,1,2,...	Emission to air/unspecified	Mass	122.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, perfluoro-	Emission to air/high population...	Mass	8830.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, perfluoro-	Emission to air/low population ...	Mass	8830.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, perfluoro-	Emission to air/low population ...	Mass	8830.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, perfluoro-	Emission to air/lower stratosph...	Mass	8830.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, perfluoro-	Emission to air/unspecified	Mass	8830.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, perfluorocyclo-	Emission to air/high population...	Mass	17340.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Propane, perfluorocyclo-	Emission to air/unspecified	Mass	17340.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Sulfur hexafluoride	Emission to air/high population...	Mass	22800.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Sulfur hexafluoride	Emission to air/low population ...	Mass	22800.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Sulfur hexafluoride	Emission to air/low population ...	Mass	22800.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Sulfur hexafluoride	Emission to air/lower stratosph...	Mass	22800.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ Sulfur hexafluoride	Emission to air/unspecified	Mass	22800.0	kg CO2 eq/kg	none
☒ trifluoromethyl sulphur penta...	Emission to air/unspecified	Mass	17700.0	kg CO2 eq/kg	none

Figura 3 - Especies contribuyentes a la categoría de impacto “Acidificación” y sus factores de conversión para llevarlos a la unidad indicadora de categoría.

IMPACT INDICATORS							
Life Cycle Inventory (LCI)				Life Cycle Impact Assessment (LCIA)			
Coarse aggregate for asphalt (crushed granite)	Renew En. (non raw mat)	0,7407	MJ	Acidification	0,0272	kg SO2 eq	per 1 SHORT-TON
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	-	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	0,7407	MJ	Eutrophication	0,0039	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	30,66	MJ	Fossil Fuel Depletion	-	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	0	MJ	Global Warming	2,06	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	30,66	MJ	Human Health - Cancer	-	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	-	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	9,88E-05	Short-ton	Human Health - Particulates	-	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	3,40E-08	Short-ton	Ozone Depletion	3,81E-08	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	-	Short-ton	Smog Formation	0,744	kg O3 eq	
	Net Use of Fresh Water	0,0191	m3	-	-	-	
SCM Usage	0	Short-ton	-	-	-		
Fine aggregate for asphalt (crushed granite)	Renew En. (non raw mat)	5,88	MJ	Acidification	0,0363	kg SO2 eq	per 1 SHORT-TON
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	-	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	5,88	MJ	Eutrophication	0,0163	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	64,27	MJ	Fossil Fuel Depletion	-	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	0	MJ	Global Warming	4,2	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	64,27	MJ	Human Health - Cancer	-	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	-	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	1,00E-04	Short-ton	Human Health - Particulates	-	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	1,60E-07	Short-ton	Ozone Depletion	2,81E-07	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	-	Short-ton	Smog Formation	1,02	kg O3 eq	
	Net Use of Fresh Water	0,038	m3	-	-	-	
SCM Usage	0	Short-ton	-	-	-		
Asphalt Binder (no additives, from crude oil)	Renew En. (non raw mat)	183	MJ	Acidification	1,61	kg SO2 eq	per 1 SHORT-TON
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	158	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	183	MJ	Eutrophication	0,1506	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	11158	MJ	Fossil Fuel Depletion	4,826	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	37195	MJ	Global Warming	578	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	48353	MJ	Human Health - Cancer	1,41E-06	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	9,87E-05	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	1,93E+00	Short-ton	Human Health - Particulates	1,33E-01	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	1,39E-01	Short-ton	Ozone Depletion	2,46E-08	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	-	Short-ton	Smog Formation	32,66	kg O3 eq	
	Net Use of Fresh Water	1,52	m3	-	-	-	
Asphalt Binder (3,5% SBS)	Renew En. (non raw mat)	218	MJ	Acidification	1,92	kg SO2 eq	per 1 SHORT-TON
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	157	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	218	MJ	Eutrophication	0,1427	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	14152	MJ	Fossil Fuel Depletion	5135	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	35834	MJ	Global Warming	694	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	49986	MJ	Human Health - Cancer	1,41E-06	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	9,76E-05	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	1,93E+00	Short-ton	Human Health - Particulates	1,51E-01	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	1,39E-01	Short-ton	Ozone Depletion	2,90E-08	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	-	Short-ton	Smog Formation	38,7	kg O3 eq	
	Net Use of Fresh Water	2,18	m3	-	-	-	
Ground Tire Rubber (recycled, coproduct or waste material)	Renew En. (non raw mat)	41,41	MJ	Acidification	0,8775	kg SO2 eq	per 1 SHORT-TON
	Renew En. (raw mat)	23,1	MJ	Ecotoxicity	25,38	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	64,51	MJ	Eutrophication	0,108	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	4848	MJ	Fossil Fuel Depletion	52,93	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	0	MJ	Global Warming	229	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	4848	MJ	Human Health - Cancer	6,35E-07	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	1	Short-ton	Human Health - Non Cancer	1,13E-05	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	-	Short-ton	Human Health - Particulates	6,21E-02	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	-	Short-ton	Ozone Depletion	2,82E-05	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	-	Short-ton	Smog Formation	6,74	kg O3 eq	
	Net Use of Fresh Water	0	m3	-	-	-	
Pellets de Polietileno (SB, B)	Renew En. (non raw mat)	16199,4	MJ	Acidification	0,499206	kg SO2 eq	per 1 SHORT-TON
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	-	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	16199,4	MJ	Eutrophication	-	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	204,972	MJ	Fossil Fuel Depletion	-	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	709,688	MJ	Global Warming	56,4224	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	914,66	MJ	Human Health - Cancer	-	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	906,946	Short-ton	Human Health - Non Cancer	-	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	0,00E+00	Short-ton	Human Health - Particulates	-	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	0,00E+00	Short-ton	Ozone Depletion	-	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	0	Short-ton	Smog Formation	-	kg O3 eq	
	Net Use of Fresh Water	35,1538	m3	-	-	-	

Emulsión Asfáltica (ECSE)	Renew En. (non raw mat)	149,872	MJ	Acidification	1,3775	kg SO2 eq	per 1 SHORT-TON
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	-	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	149,872	MJ	Eutrophication	-	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	4518,2	MJ	Fossil Fuel Depletion	-	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	30525,4	MJ	Global Warming	250,154	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	35043,6	MJ	Human Health - Cancer	-	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	-	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	4,63942	Short-ton	Human Health - Particulates	-	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	2,04E-02	Short-ton	Ozone Depletion	-	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	0,0112404	Short-ton	Smog Formation	-	kg O3 eq	
Net Use of Fresh Water	2,11584	m3	-	-	-		
Ligante asfáltico altamente modificado (HIMA)	Renew En. (non raw mat)	286,52	MJ	Acidification	2,15992	kg SO2 eq	per 1 SHORT-TON
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	-	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	286,52	MJ	Eutrophication	0,0168606	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	108436,8	MJ	Fossil Fuel Depletion	-	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	37798,6	MJ	Global Warming	342,722	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	146235,4	MJ	Human Health - Cancer	4,37E-06	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	5,38E-06	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	1,05E+01	Short-ton	Human Health - Particulates	-	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	7,60E-06	Short-ton	Ozone Depletion	1,32E-05	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	0,142158	Short-ton	Smog Formation	-	kg O3 eq	
Net Use of Fresh Water	0,822092	m3	-	-	-		
PAVER (Nonroad Diesel Fuel; 100-175 HP)	Renew En. (non raw mat)	0	MJ	Acidification	0,1345	kg SO2 eq	per 1 HOUR
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	-	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	0	MJ	Eutrophication	0,0085	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	573	MJ	Fossil Fuel Depletion	-	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	0	MJ	Global Warming	41,83	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	573	MJ	Human Health - Cancer	3,28E-08	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	4,93E-08	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	-	Short-ton	Human Health - Particulates	1,79E-02	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	-	Short-ton	Ozone Depletion	1,42E-09	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	-	Short-ton	Smog Formation	4,77	kg O3 eq	
Net Use of Fresh Water	-	m3	-	-	-		
ROLLER (Nonroad Diesel Fuel; 100-175 HP)	Renew En. (non raw mat)	0	MJ	Acidification	0,1321	kg SO2 eq	per 1 HOUR
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	-	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	0	MJ	Eutrophication	0,0083	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	563	MJ	Fossil Fuel Depletion	-	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	0	MJ	Global Warming	41,08	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	563	MJ	Human Health - Cancer	3,22E-08	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	4,84E-08	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	-	Short-ton	Human Health - Particulates	1,75E-02	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	-	Short-ton	Ozone Depletion	1,39E-09	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	-	Short-ton	Smog Formation	4,69	kg O3 eq	
Net Use of Fresh Water	-	m3	-	-	-		
HMA CONTINUOUS PLANT	Renew En. (non raw mat)	312	MJ	Acidification	0,014	kg SO2 eq	per 1 HOUR
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	-	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	0	MJ	Eutrophication	0,0006	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	244	MJ	Fossil Fuel Depletion	-	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	0	MJ	Global Warming	2,19	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	244	MJ	Human Health - Cancer	-	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	-	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	-	Short-ton	Human Health - Particulates	-	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	-	Short-ton	Ozone Depletion	2,88E-11	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	-	Short-ton	Smog Formation	0,332	kg O3 eq	
Net Use of Fresh Water	0,0031	m3	-	-	-		
WMA CONTINUOUS PLANT	Renew En. (non raw mat)	150	MJ	Acidification	0,0112	kg SO2 eq	per 1 HOUR
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	-	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	150	MJ	Eutrophication	0,0005	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	200	MJ	Fossil Fuel Depletion	-	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	0	MJ	Global Warming	1,75	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	200	MJ	Human Health - Cancer	-	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	-	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	-	Short-ton	Human Health - Particulates	-	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	-	Short-ton	Ozone Depletion	2,88E-11	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	-	Short-ton	Smog Formation	0,2656	kg O3 eq	
Net Use of Fresh Water	0,004	m3	-	-	-		

MILLING MACHINE (Nonroad Diesel Fuel; 50-75 HP)	Renew En. (non raw mat)	0	MJ	Acidification	0,1028	kg SO2 eq	per 1 HOUR
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	-	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	0	MJ	Eutrophication	0,0065	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	312	MJ	Fossil Fuel Depletion	-	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	0	MJ	Global Warming	22,76	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	312	MJ	Human Health - Cancer	2,64E-08	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	3,90E-08	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	-	Short-ton	Human Health - Particulates	1,36E-02	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	-	Short-ton	Ozone Depletion	7,73E-10	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	-	Short-ton	Smog Formation	3,66	kg O3 eq	
Net Use of Fresh Water	-	m3	-	-	-		
Mezcladora PMB (Diesel)	Renew En. (non raw mat)	0	MJ	Acidification	0,0624	kg SO2 eq	per 1 HOUR
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	0,0472	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	0	MJ	Eutrophication	3,90E-03	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	190	MJ	Fossil Fuel Depletion	-	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	0	MJ	Global Warming	13,83	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	190	MJ	Human Health - Cancer	1,60E-08	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	2,73E-08	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	-	Short-ton	Human Health - Particulates	8,30E-03	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	-	Short-ton	Ozone Depletion	4,70E-10	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	-	Short-ton	Smog Formation	2,22	kg O3 eq	
Net Use of Fresh Water	-	m3	-	-	-		
TRUCK (Diesel)	Renew En. (non raw mat)	-	MJ	Acidification	0,0011	kg SO2 eq	per 1 SHORT-TON-MILE
	Renew En. (raw mat)	0	MJ	Ecotoxicity	0,1001	CTUeco/kg	
	Total Renew. Energy Use	-	MJ	Eutrophication	6,66E-05	kg N eq	
	Nonrenew. En. (non raw mat)	1,75	MJ	Fossil Fuel Depletion	-	MJ surplus	
	Nonrenew. En. (raw mat)	0	MJ	Global Warming	0,2264	kg CO2 eq	
	Total Nonrenew. Energy Use	1,75	MJ	Human Health - Cancer	9,76E-12	CTU/kg	
	Recycled Matl. Use	0	Short-ton	Human Health - Non Cancer	5,90E-09	CTU/kg	
	Disposed Non-Hazardous Waste	-	Short-ton	Human Health - Particulates	1,90E-05	kg PM2,5 eq	
	Disposed Hazardous Waste	-	Short-ton	Ozone Depletion	4,06E-09	kg CFC-11 eq	
	Disposed Radio-Active Waste	-	Short-ton	Smog Formation	0,0348	kg O3 eq	
Net Use of Fresh Water	-	m3	-	-	-		