



INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE USINAGEM NA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Bruno Guida Gouveia

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Orientador: Luis Alberto Herrmann do Nascimento

Rio de Janeiro
Dezembro de 2023

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE USINAGEM NA ANÁLISE DE CICLO DE
VIDA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Bruno Guida Gouveia

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Orientadores: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Luis Alberto Herrmann do Nascimento

Aprovador por: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Luis Alberto Herrmann do Nascimento

Hostilio Xavier Ratton Neto

Felipe Almeida Corrêa do Nascimento

Michéle Dal Toé Casagrande

Leni Figueiredo Mathias Leite

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2023

Gouveia, Bruno Guida

Influência da temperatura de usinagem na análise de ciclo de vida de misturas asfálticas / Bruno Guida Gouveia.

– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XVI, 163 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Luis Alberto Herrmann do Nascimento

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 27-88.

1. Análise do Ciclo de Vida. 2. Pavimentos asfálticos.
3. Temperatura de usinagem. I. Silva, Marcelino Aurélio Vieira da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

“Ninguém pode construir para você a ponte sobre a qual você deve cruzar o fluxo da vida. Ninguém pode fazer isso além de você mesmo” (Nietzsche).

AGRADECIMENTOS

Nessa seção eu gostaria de agradecer àqueles que, mesmo que de forma indireta e inconsciente, contribuíram para o desenvolvimento dessa tese e sem auxílio dos quais esse trabalho teria sido muito mais difícil.

Inicialmente, agradeço a Deus, por me dar a vida e me manter de pé diante das adversidades.

A meus pais, Jayme e Vitória, por me apoiarem desde a minha formação básica e darem todo o apoio necessário para trilhar a carreira acadêmica.

Ao meu avô, Hugo Guida, por me inspirar a seguir a carreira de engenheiro de civil buscando sempre a excelência em tudo a que se prestar a fazer.

Aos meus irmãos Camila e Felipe, pela compreensão e atenção.

A minha esposa, Débora, por sempre me respeitar, incentivar e apoiar.

Ao meu enteado, Felipe, por me apoiar e incentivar.

Ao meu orientador, o Professor Marcelino Aurélio Vieira da Silva, por seu apoio e orientação que se iniciaram no mestrado e seguiram por todo o doutorado frutificando publicações acadêmicas realizadas em conjuntos. Sou muito grato pelo apoio e a aprendizagem.

A minha colega do doutorado, Marina Donato, que chegou quase no final, mas que virou uma grande parceira de discussões técnicas acirradas e produção acadêmicas. Obrigado pela amizade e parceria fundamentais.

Aos colegas do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Rio de Janeiro: Filipe Nascimento, Filipe Ribeiro, Felipe Costa, Breno Garcia, Claudeny Santana, Alexandre de Medeiros, Isabella Martins e Fábio Martino. Sou grato pelos momentos que passamos juntos e pelos trabalhos que produzimos.

À equipe de coordenação do curso de pós-graduação em Engenharia de Transportes: Prof. Glaydston Ribeiro, Jane Corrêa e Dona Helena, por todo o apoio na parte administrativa.

Aos professores Dr. Hostilio Ratton, Dr. Luis Nascimento, Dr. Filipe Nascimento, Dra. Leni Leite e Dra. Michéle Casagrande. Quero expressar meus sinceros agradecimentos à banca avaliadora da minha tese por suas importantes sugestões e contribuições.

Aos professores do Programa de pós-graduação em Engenharia de Transportes da COPPE UFRJ pela contribuição ao desenvolvimento acadêmico e profissional.

A CAPES, pelo apoio financeiro mediante bolsa de estudo concedida.

Resumo da Tese apresentado à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE USINAGEM NA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Bruno Guida Gouveia

Dezembro/2023

Orientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Orientador: Luis Alberto Herrmann do Nascimento

Programa: Engenharia de Transportes

Tendo como princípios que para a realização de qualquer atividade humana o desenvolvimento sustentável e que o setor de pavimentação consome grandes quantidades de recursos naturais, em especial nas fases de construção, manutenção e operação, propôs-se o desenvolvimento de um procedimento de comparação de pavimentos flexíveis brasileiros a partir da análise do trade-off entre o consumo energético necessário para os processos de preparo das misturas asfálticas associados a suas temperaturas de usinagem e o seu desempenho mecânico. Analisou-se 4 misturas asfálticas sujeitas a 2 tráfegos distintos gerando 8 cenários. Com isso, foi possível constatar que a temperatura de usinagem exerce influência sobre os processos de hierarquizações de pavimentos asfálticos realizados por meio de Análises de Ciclo de Vida (ACV). Outra questão foi que, para os concretos betuminosos usinados a quente (CBUQ) considerados para os cenários dessa tese, as contribuições percentuais das etapas de extração, fabricação e transporte dos insumos para elaboração dos CBUQ para a usina de asfalto corresponderam taxas entre 55% e 60% das emissões de CO₂ Equivalente. Além disso, concluiu-se que os quantitativos e tipos de insumos e processos necessários para se obter as toneladas de um dado tipo de revestimento também exercem efeito sobre os resultados das avaliações. Por fim, chega-se à conclusão de que, é prudente se considerar a implantação do pavimento asfáltico como um todo, pois, em última análise as camadas

trabalham de forma integrada e as espessuras do revestimento dependem das demais camadas bem como os impactos ambientais que geram.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

INFLUENCE OF MACHINING TEMPERATURE ON THE LIFE CYCLE
ANALYSIS OF ASPHALT MIXTURES

Bruno Guida Gouveia

December /2023

Advisor: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Advisor: Luis Alberto Herrmann do Nascimento

Department: Transportation Engineering

Based on the principles that sustainable development is necessary for any human activity and that the paving sector consumes large quantities of natural resources, especially in the construction, maintenance and operation phases, we proposed the development of a procedure for comparing Brazilian flexible pavement by analyzing the trade-off between the energy consumption required for the asphalt mix preparation processes associated with their machining temperatures and their mechanical performance. Four asphalt mixtures subjected to two different traffic flows were analyzed, generating eight scenarios. As a result, it was possible to verify that the machining temperature has an influence on the asphalt pavement prioritization processes carried out by means of Life Cycle Analysis (LCA). Another issue was that, for the hot-mix asphalt concrete (HMA) considered for the scenarios in this thesis, the percentage contributions of the extraction, manufacturing and transportation stages of the inputs for making HMA to the asphalt plant corresponded to rates of between 55% and 60% of the CO₂ Equivalent emissions. In addition, it was concluded that the quantities and types of inputs and processes required to obtain tons of a given type of surfacing also have an effect on the results of the evaluations. Finally, the conclusion is that it is prudent to consider the implementation of the asphalt pavement as a whole, because ultimately the

layers work in an integrated system and the thickness of the surfacing depends on the other layers as well as the environmental impacts they generate.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1	Considerações iniciais	18
1.2	Formulação do problema.....	20
1.3	Justificativa e motivações.....	20
1.4	Premissas e hipóteses	22
1.5	Delimitação do trabalho	23
1.6	Objetivos da pesquisa.....	24
1.5.1	Objetivo geral.....	24
1.5.2	Objetivos específicos.....	24
1.7	Estrutura da tese	24
2.	ANÁLISES DE CICLO DE VIDA	26
2.1	Considerações iniciais	26
2.2	Pesquisa bibliométrica sobre ACV.....	27
2.3	Etapas da ACV	30
2.3.1	Definição de objetivos e escopo da ACV.....	31
2.3.2	Inventário do Ciclo de Vida	31
2.3.3	Análise de Impacto do Ciclo de Vida.....	35
2.3.3.1	Categorias de Impactos, Indicadores e modelos de Caracterização	37
2.3.4	Indicadores de Impacto Ambiental.....	41
2.3.4.1	Alterações Climáticas.....	45
2.3.4.2	Normalização e Ponderação	46
2.3.4.3	Métodos de AICV	49
2.3.5	Interpretação da ACV.....	50
2.4	Considerações finais.....	50
3.	CICLO DE VIDA DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	54
3.1	Considerações iniciais	54
3.2	Etapas ACV de pavimentos.....	54
3.3	Exploração e produção de insumos virgens	57
3.3.1	Asfalto	58
3.3.2	Agregados minerais	60

3.4	Usinagem e fabricação da mistura asfáltica	62
3.5	Transporte.....	62
3.6	Construção do pavimento	62
3.7	Unidade funcional	63
3.8	Considerações finais.....	64
4.	PROPOSTA DE PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	70
4.1	Considerações iniciais	70
4.2	Determinação dos pavimentos.....	72
4.2.1	Classificação da Via	72
4.2.2	Determinação dos Materiais	72
4.3	Dimensionamento dos pavimentos.....	73
4.3.1	Caracterização mecânica	73
4.3.2	Inputs do dimensionamento.....	74
4.3.3	Outputs do dimensionamento	74
4.4	Levantamento de inventário de serviços e processos.....	75
4.5	Determinação do inventário de análise de ciclo de vida	76
4.6	Determinação da Análise de Impacto de Ciclo de Vida.....	76
4.7	Determinação dos indicadores de desempenho ambiental	77
4.8	Considerações iniciais	77
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
5.1	Exposição dos dados	78
5.2	Dimensionamento mecanístico-empírico	86
5.3	Inventário de ciclo de vida (ICV).....	87
5.4	Análise de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	89
5.5	Indicador de Desempenho Ambiental	Erro! Indicador não definido.
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	94
6.1	Considerações finais e limitações.....	97
6.2	Proposições para novos estudos	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
	APÊNDICE A	113
A.1	Dimensionamento dos pavimentos.....	113
A.2	Determinação da energia gasta na usinagem das misturas.....	113

A.3	Quantitativos de materiais para construção dos pavimentos.....	116
A.4	Quantidade de insumos segundo SICRO (2023).....	117
A.5	Banco de dados para alimentar o <i>software</i> SimaPro	127
A.6	Contribuições para mudanças climáticas	143
A.7	Dados da pesquisa bibliométrica	158
ANEXO I.....		161
I.	Caracterização mecânica das misturas asfálticas	161
II.	Caracterização mecânica da base, sub-base e subleito.....	162

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição temporal dos artigos científicos publicados de 1970 a 2019 envolvendo as palavras-chave <i>Life, Cycle, Assessment</i> e <i>Pavement</i>	28
Figura 2.2 – Palavras-chaves encontradas nos artigos científicos publicados de 2009 a 2019 dentro dos trabalhos encontrados por meio da pesquisa das palavras-chave <i>Life, Cycle, Assessment</i> e <i>Pavement</i>	29
Figura 2.3 – Periódicos nos quais foram publicados os artigos científicos publicados de 2009 a 2019 dentro dos trabalhos encontrados por meio da pesquisa das palavras-chave <i>Life, Cycle, Assessment, Pavement, Asphalt, Sustainable, Sustainability</i>	30
Figura 2.4 – Estrutura de uma Análise de Ciclo de Vida.	31
Figura 2.5 – Ilustração da relação de proximidade entre os tipos de LCI.	33
Figura 2.6 – Ilustração da relação entre os fluxos elementares, impactos intermediários e finais.	43
Figura 2.7 – Diferença entre estudos que utilizam uma abordagem de Análise de Ciclo de Vida e que adotam métodos para determinação de Pegadas Ambientais.	45
Figura 3.1 – Ilustração das etapas do ciclo de vida de um pavimento flexível rodoviário.	56
Figura 3.2 – Ilustração de unidade processual genérica quanto suas entradas e saídas do ponto de vista ambiental.	57
Figura 3.3 – Esquema de obtenção do asfalto para pavimentação.	58
Figura 3.4 – Esquema de obtenção de agregados graúdos virgens para pavimentação.	61
Figura 3.5 – Esquema de obtenção de agregados miúdos virgens para pavimentação.	61
Figura 4.1 – Fluxograma descritivo do procedimento metodológico proposto para a realização de uma Análise de Ciclo de Vida de pavimentos asfálticos.	71
Figura 5.1 – Ilustração do pavimento rodoviário.	78
Figura 5.2 – Ilustração da plataforma adotada para a elaboração dos cenários.	78
Figura 5.3 – Ilustração das fases de extração, fabricação e transporte de cal hidratada para a usina de asfalto.	88
Figura 5.4 – Ilustração do processo de usinagem e transporte da mistura asfáltica para a obra e construção de revestimento para todos os cenários.	88
Figura 5.5 – Ilustração do processo de fabricação e transporte da mistura de solos para obra, além da construção propriamente dita da camada de base dos cenários.	89
Figura 5.6 – Ilustração dos processos de escavação e construção da camada de sub-base para todos os cenários.	89

Figura 5.7 – Emissões de CO ₂ equivalente dos cenários discriminadas por camada do pavimento.	90
Figura 5.8 – Emissões de CO ₂ equivalente dos cenários discriminadas por etapa do ciclo de vida da camada dos revestimentos.....	91
Figura 5.9 – Ilustração das quantidades de CO ₂ equivalente emitidas pelos processos de secagem e aquecimento dos agregados na usina de asfalto de misturas asfálticas versus suas temperaturas de usinagem para cada cenário.....	92
Figura 5.10 – Ilustração das quantidades de CO ₂ equivalente emitidas pelos revestimentos asfaltos versus suas temperaturas de usinagem para cada cenário.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Contribuições relativas dos principais GEE para o incremento do Efeito Estufa.....	46
Tabela 2.2 – Fatores anuais de normalização para alguns tipos de impactos ambientais intermediários.....	48
Tabela 2.3 – Principais Indicadores de impactos ambientais intermediários associados a emissões.....	51
Tabela 2.4 – Métodos de AICV usados em AICV de infraestruturas rodoviárias (continua).....	51
Tabela 3.1 – ACV de asfalto usado em pavimentação rodoviária e seus impactos ambientais.....	59
Tabela 3.2 – Exemplos de polímeros utilizados na modificação de ligantes asfálticos.....	60
Tabela 3.3 – Coletânea de trabalhos que empregaram ACV em estudos sobre pavimentos rodoviários, expondo as etapas consideradas e os indicadores de impacto ambiental analisados (continua).....	64
Tabela 3.4 – Exemplos combinações de bases de dados, métodos de AICV, softwares e impactos estimados na realização de ACV de pavimentos rodoviários (continua).....	66
Tabela 5.1 – Descrição dos cenários.....	79
Tabela 5.2 – Relação de materiais adotados na elaboração dos cenários segundo SICRO.....	79
Tabela 5.3 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para o revestimento com código 4011463 no SICRO.....	81
Tabela 5.4 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para o revestimento com código 4011466 no SICRO.....	82
Tabela 5.5 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para o revestimento com código 4011471 no SICRO.....	83
Tabela 5.6 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para a imprimação com código 4011351 no SICRO.....	84
Tabela 5.7 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para a base com código 4011549 no SICRO (continua).....	84
Tabela 5.8 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para a sub-base com código 4011227 no SICRO.....	85
Tabela 5.9 – Revestimentos para cada cenário dimensionados para VMD de 1350.....	86
Tabela 5.10 – Revestimentos para cada cenário dimensionados para VMD de 2700...	87

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AICV	Análise de Impacto de Ciclo de Vida
ACV	Análise de ciclo de vida
AIP	Análise de Insumo Produto
AP	Análise de Processos
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CF	Fatores de caracterização
CH ₄	Gás Metano
CI	Categoria de Impacto
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
CO ₂	Dióxido de carbono
CV	Ciclo de vida
FV	Fator de veículos
GEE	Gases de efeito estufa
GWP	Potencial de aquecimento global
HMA	Hot-mix Asphalt concrete
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
LCA	Life Cycle Analysis
MA	<i>Matrix augmentation</i>
MIP	Matrizes Insumo Produto
N ₂ O	Óxido nitroso
FN	Fatores de Normalização
PXC	Path Exchange
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
SICRO	Sistema de Custos Rodoviários
VMDA	Volume Médio Diário Anual

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A configuração atual das demandas por transportes pode ser descrita como sendo fruto das interações entre os prismas econômico, social e cultural. Quanto a perspectiva econômica, na busca pela melhor eficiência na exploração dos recursos produtivos, os investimentos públicos e privados focaram-se em desenvolver as aptidões e vocações já estabelecidas de cada região. Esse fenômeno proporcionou a especialização das atividades produtivas exercidas em cada uma dessas áreas produtoras. Com relação aos enfoques socioculturais, cada local possui equipamentos culturais, como museus, teatros e estádios. Deve-se também considerar as atividades de lazer tais quais: praias, parques temáticos, festivais que podem ser sazonais e viáveis em uma determinada parte do território (MELLO, 1975).

As especializações e atratividades de uma localidade podem não atender a todas as necessidades de sua população, tal situação pode incorrer na formação de relações de interdependência entre as regiões. O sistema de transporte, por meio do uso de recursos materiais, humanos, financeiros e intelectuais, é o conjunto de atividades que possibilita os deslocamentos de pessoas e mercadorias, desta forma, conectando serviços e equipamentos que os povos modernos desenvolveram entre si (MELLO, 1975; D'AGOSTO, 2015; STENICO *et al.*, 2019).

Ratificando a relevância que os transportes têm para a sociedade brasileira, o 6º artigo da Constituição estabelece os direitos sociais, ou seja, direitos básicos que todos os cidadãos brasileiros devem ter garantidos pelo Estado, em 2013, esse artigo constitucional foi acrescido do direito social ao transporte (BRASIL, 1988).

Além de direito constitucionalmente garantido, segundo CNT (2019b), o transporte rodoviário é responsável por 61% do transporte da carga e 95% do transporte de passageiros no país, sendo o principal modo da matriz de transporte. Apesar da elevada importância para economia nacional, muitos trechos rodoviários não apresentam condições ideais ao tráfego, sendo constatado que 75% da extensão da malha apresenta sinais de desgaste, como trincas, afundamentos ou buracos. Neste contexto, a qualidade das rodovias assume papel essencial não só para a segurança, quanto para a eficiência deste modo. A estrutura que viabiliza o transporte rodoviário pode ser subdividida em

duas partes, infraestrutura e superestrutura (DNIT, 2010). Em especial, o segundo elemento, objeto de estudo desse estudo, pode ser definido como uma estrutura construída em múltiplas camadas com a finalidade de resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, proporcionando aos usuários as melhores condições de rolamento, conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Do ponto de vista ambiental, um dos principais conceitos que devem nortear a eficiência de qualquer atividade humana é o de “desenvolvimento sustentável”. Tal ideia é fundamentada nos fatos de que existe uma capacidade finita do planeta Terra fornecer os insumos necessários as empreitadas do ser humano e de que também existe um limite de absorção dos efeitos desses processos sem que estes causem alterações nos ciclos naturais da biosfera. Cabe ressaltar que indesejáveis alterações, como mudanças climáticas vêm sendo evidenciadas (IPCC, 2014; PASETTO *et al.*, 2017). Da mesma forma, considera-se que as referidas questões estão condicionadas às mudanças em aspectos sociais, culturais e econômicos, bem como ao desenvolvimento tecnológico. Em resumo, o conceito de “desenvolvimento sustentável” visa compatibilizar as demandas humanas, atuais e futuras, com a oferta de recursos naturais disponíveis na natureza (BRUNDTLAND, 1987).

Dessa forma, a fim de reduzir os impactos ambientais provenientes dos padrões de produção e consumo, é essencial que novas abordagens socioeconômicas, tecnológicas e políticas ambientais estejam alinhadas com as discussões em andamento, visando aprimorar a qualidade de vida da sociedade. Logo, a Análise de Ciclo de Vida (ACV) tornou-se uma das metodologias mais adequadas para quantificar de maneira abrangente os impactos ambientais de um produto, processo ou serviço ao longo de sua vida, desde a fase de extração de recursos naturais até a disposição final (VEGA, SANTOS e MARTINEZ-ARGUELLES, 2022; NASCIMENTO, 2021). Assim sendo, a realização desses estudos são fundamentais na compreensão e na implementação de medidas para mitigar os impactos ambientais associados a essas estruturas rodoviárias.

Em relação aos pavimentos asfálticos, é essencial compreender os materiais empregados em suas camadas, sendo o ligante asfáltico e os agregados os principais componentes. O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos diversos tipos de ligantes asfálticos é crucial para garantir o desempenho e a vida útil dos pavimentos. Os agregados desempenham um papel fundamental ao suportar e transmitir as cargas

mecânicas geradas pelos veículos, além de resistirem ao desgaste resultante das solicitações. Por sua vez, o ligante asfáltico tem a função de unir os agregados e conferir impermeabilidade ao revestimento. Cabe ressaltar que todas as camadas do pavimento sofrem deformações elásticas significativas, mesmo sem atingir o limite de ruptura (MEDINA e MOTTA, 2015; OSORTO e CASAGRANDE, 2023).

Além disso, as diferenças na composição e temperatura de fabricação dos diversos tipos de misturas, bem como no teor de umidade e temperatura inicial das matérias-primas resultam em necessidades distintas de energia térmica (TE) (SANTOS *et al.*, 2018). Para isso é necessário compreender os consumos energéticos de vários tipos de usinas de asfalto. Assim sendo, de acordo com Thives e Ghisi (2017), a energia consumida nas usinas de mistura asfáltica engloba a eletricidade requerida para a operação dessas usinas, bem como o combustível (geralmente óleo pesado) utilizado para aquecer os agregados. Dessa forma, o conhecimento aprofundado desses aspectos contribui não apenas para a eficiência operacional, mas também para a busca de soluções mais sustentáveis no setor.

É evidente destacar que várias investigações foram conduzidas, aplicando a metodologia de Análise do Ciclo de Vida, a fim de avaliar os potenciais impactos ambientais associados ao ciclo de vida dos processos relacionados ao estudo das propriedades dos materiais que compõem o revestimento asfáltico (SANTOS *et al.*, 2018; THIVES e GHISI, 2017; VEGA, SANTOS e MARTINEZ-ARGUELLES, 2022). Neste contexto, diante a evolução das pesquisas sobre os materiais que constituem a camada de revestimento asfáltico, torna-se relevante o estudo do impacto ambiental gerado pela influência da temperatura nas misturas asfálticas.

1.2 Formulação do problema

Como forma de aprimorar o entendimento de como os pavimentos asfálticos podem contribuir para as mudanças climáticas o problema de pesquisa adotado por essa Tese foi: “De que modo a temperatura de usinagem de misturas asfálticas pode influenciar a hierarquização de projetos de revestimentos asfálticos?”.

1.3 Justificativa e motivações

À medida que constatamos as numerosas transformações ao meio ambiente, torna-se evidente que essas mudanças estão intrinsecamente ligadas às práticas produtivas e ao

consumo exacerbado que caracterizam a sociedade contemporânea. Esse padrão de interação entre o homem e o ambiente está resultando em impactos ambientais cada vez mais evidentes, afetando os ecossistemas e a biodiversidade de maneira alarmante.

A resposta a esse cenário é desafiadora e demanda uma revisão profunda na forma como abordamos a produção e o consumo. Diante disso, a busca por alternativas sustentáveis não é apenas uma escolha desejável, mas uma necessidade urgente para garantir um futuro habitável para as próximas gerações. Nesse contexto, torna-se essencial explorar novas abordagens nos domínios da socioeconômico e ambiental.

O setor de infraestrutura de transportes é um exemplo que se encaixa nesse contexto, pois suas estruturas consomem quantidades consideráveis de recursos naturais, notadamente nas fases de construção e conservação do pavimento (HASAN, WHYTE e JASSMI, 2019, PLATI, 2019). Além disso, os impactos causados por essas infraestruturas, que afetam o meio ambiente, podem ser classificados como positivos ou negativos. No entanto, espera-se que as ações de medidas atenuadoras ou mitigadoras minimizem os impactos negativos e potencializem os impactos positivos, para que a implantação do sistema de transporte seja ambientalmente sustentável (D'AGOSTO, 2015).

Considerando-se os resultados da pesquisa bibliométrica e o que foi exposto na revisão bibliográfica, verificou-se a importância crescente de estudos que utilizassem a Análise de Ciclo de Vida como ferramenta para a promoção de pavimentos sustentáveis. Em especial para a situação brasileira em que 22,8% do gás carbônico (CO₂) é emitido pelo setor dos transportes, sendo 89,9% proveniente do modo rodoviário de forma geral (CNT, 2020). Além disso, porque aproximadamente 12% da extensão total da malha rodoviária brasileira de 1,7 milhão de km é revestida 99% com revestimentos asfálticos ressalta-se a importância dos pavimentos asfálticos (CNT, 2022). Só a manutenção dessa malha já existente demandaria uma série de estudos quanto a sustentabilidade.

De acordo com Inyim *et al.* (2016) e Araújo, Santos e Arguelles (2020), nos últimos vinte anos, os estudos de Análise de Ciclo de Vida (ACV) sobre infraestruturas de pavimentos têm concentrado principalmente na comparação entre diferentes tipos de revestimento, envolvendo misturas asfálticas, concreto e materiais reciclados, como o

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Entretanto, há muito a ser explorado em termos de pesquisa no que diz respeito ao revestimento e à temperatura de usinagem.

A partir da análise dos trabalhos de Santos *et al.* (2018), que aparece na revisão bibliométrica, e Vega *et al.* (2020) pode-se observar, por exemplo, a importância que a temperatura de usinagem das misturas asfálticas tem nas emissões de gases de efeito estufa no Ciclo de Vida dos pavimentos asfálticos. Contudo, essa tese visou aprofundar o entendimento do trade-off entre o consumo energético causado pela temperatura de usinagem de misturas asfálticas e o desempenho mecânico das misturas asfálticas por meio análise de ciclo de vida de pavimentos.

Diante da crescente importância atribuída à ACV, o principal objetivo deste estudo é desenvolver um modelo de análise de ciclo de vida que considere a influência da temperatura de usinagem das misturas asfálticas. Essa abordagem busca avaliar como esse fator contribui para os impactos ambientais a partir da quantificação dos processos e banco de dados brasileiro. Por fim produzir um trabalho que possa nortear pesquisadores e responsáveis técnicos em tomadas de decisões conscientes quanto a projetos rodoviários.

1.4 Premissas e hipóteses

As premissas adotadas para o desenvolvimento desse trabalho são expostas a seguir:

- Quanto aos processos associados diretamente a elaboração dos pavimentos, as formas de escolha e caracterização dos materiais que são selecionados para comporem os pavimentos influenciam seus desempenhos mecânicos, bem como a própria previsão desse desempenho é consequência dos modelos adotados para realização desses prognósticos. Considera-se que as ferramentas escolhidas para elaborar as tarefas descritas são apropriadas sem causar distorções ou favorecimentos de qualquer amostra.
- Quanto a realização da Análise Ambiental de Ciclo de Vida de pavimentos propriamente dita, a elaboração do Inventário de Ciclo de Vida e a elaboração de indicadores de desempenho ambientais, é possível elaborar um processo

para captar os efeitos das variações nas misturas asfálticas nos impactos ambientais dos pavimentos.

A partir das premissas consideradas, testou-se a seguinte hipótese:

- A hierarquização de projetos rodoviários sustentáveis estabelecidos por meio da análise de ciclo de vida é afetada pelo *trade-off* entre o consumo energético associado as temperaturas de fabricação das misturas asfálticas e o seu desempenho mecânico?

1.5 Delimitação do trabalho

Como já comentado, no Brasil, as rodovias podem ser consideradas a espinha dorsal do sistema de transportes, pois nelas são realizadas as maiores parcelas dos transportes de passageiros e de cargas. Além disso, quando revestidas, tal tarefa é realizada utilizando-se misturas asfálticas (CNT, 2020; CNT, 2022). No processo de fabricação das misturas asfálticas os ligantes precisam ser aquecidos até atingirem viscosidades adequadas para serem misturados aos agregados minerais que por sua vez foram secos e também aquecidos. Esse processo consome grandes quantidades de energia e está associado a emissões de gases de efeito estufa. Assim sendo, várias abordagens foram desenvolvidas no intuito de reduzir os custos e o impacto ambiental das misturas asfálticas cita-se, por exemplo, as misturas mornas que visam, por meio da adição de substâncias químicas, fazer com que os ligantes asfálticos alcancem menores viscosidades a temperaturas mais baixas (HAMZAH *et al.* 2010; WANG 2021).

Embora a redução das temperaturas de usinagem e compactação sejam uma abordagem convencional para se reduzir os impactos ambientais das misturas asfálticas como o que foi praticado por Santos *et al.* (2018) e Vega *et al.* (2020). Desse modo, cabe destacar, que esses autores avaliaram em seus trabalhos o efeito da redução das temperaturas de usinagem misturas mornas sobre os impactos ambientais. Diante disso, nessa pesquisa, optou-se por avaliar concretos usinados a quente com diferentes temperaturas de usinagem, mas com consideráveis diferenças entre suas características mecânicas, como módulos resilientes e resistências à tração.

1.6 Objetivos da pesquisa

1.5.1 Objetivo geral

O principal objetivo dessa tese é investigar o efeito das temperaturas de fabricação das misturas asfálticas na hierarquização de pavimentos realizada por meio da Análise de Ciclo de Vida, buscando pavimentos mais sustentáveis.

1.5.2 Objetivos específicos

- Elaborar um procedimento metodológico para determinação do ciclo de vida de pavimentos asfálticos sensível às temperaturas de usinagem;
- Definir um procedimento para relacionar a energia requerida na usinagem de misturas asfálticas com o quilômetro construído de pavimentos;
- Analisar de que forma as temperaturas de fabricação das misturas asfálticas interferem nas contribuições associadas às mudanças climáticas dos pavimentos;
- Determinar indicadores de ACV em função as temperaturas de fabricação das misturas asfálticas para pavimentos asfálticos;
- Avaliar a sensibilidade dos indicadores de mudanças climáticas quanto as temperaturas de fabricação das misturas asfálticas.

1.7 Estrutura da tese

Esta tese está estruturada em seis capítulos, além das referências bibliográficas.

O Capítulo 1 expõem as motivações e objetivos desse estudo.

O Capítulo 2 exhibe os conceitos básicos para a elaboração de Análises de Ciclo de Vida.

O Capítulo 3 estão expostos aspectos inerentes a Análise de Ciclo de Vida de pavimentos rodoviários.

No Capítulo 4 discorre sobre o método proposto para a elaboração de Análises de Ciclo de Vida de pavimentos flexíveis nacionais.

No Capítulo 5 contém uma aplicação um estudo de caso aplicando o método proposto na porção anterior.

No Capítulo 6 apresenta as considerações para a continuidade da pesquisa.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas contendo todos os trabalhos utilizados na elaboração da tese.

2. ANÁLISES DE CICLO DE VIDA

2.1 Considerações iniciais

Pautado no fato de que existem limites para as capacidades da biosfera absorver os efeitos das atividades humanas e que, por sua vez, as ações da humanidade são mutáveis, sendo subordinadas ao grau de desenvolvimento tecnológico, organização social, econômica e cultural, surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável. Ele consiste na ideia de que é possível, através da combinação entre a gerência de oferta e demanda de recursos produtivos, e o incentivo a aprimoramentos tecnológicos, gerar crescimento econômico para as gerações de pessoas hoje sem que este inviabilize o atendimento das necessidades das gerações futuras (BRUNDTLAND, 1987).

Com o objetivo de facilitar a racionalização e o encadeamento lógico dos impactos que uma infraestrutura rodoviária possa gerar esses efeitos são organizados em três grupos, quais sejam: econômico; ambiental; e social. Assim sendo, essa tríade pode ser entendida como os pilares para se avaliar um empreendimento sob uma perspectiva do desenvolvimento sustentável (SANTOS *et al.*, 2019).

A utilização de princípios de sustentabilidade no gerenciamento de atividades e negócios por parte de agências, empresas, organizações, instituições governamentais vêm crescendo, embora não seja algo novo, com a finalidade de sanar ou mitigar as consequências negativas e, ao mesmo tempo, maximizar os benefícios das empreitadas humanas. Esse comportamento tem o objetivo de enfatizar os principais fatores ambientais, sociais e econômicos no processo de tomada de decisão. Uma das principais razões que motivam esse interesse vem do aumento da compreensão de como as atividades humanas locais e regionais afetam as dinâmicas do meio ambiente (exemplos: clima, ecossistemas e esgotamento de recursos), às vezes, de forma global. Outras provocações vêm de repercussões sociais (exemplos: acessibilidade, mobilidade e bem-estar) e custos econômicos (custos e retornos dos investimentos) (VAN DAM *et al.*, 2015).

Em face das incertezas climáticas e da exaustão dos recursos naturais é urgente a revisão dos paradigmas que norteiam as estratégias de desenvolvimento de diversos setores da economia, em especial aqueles que têm grande potencial de incrementar tais problemas. O caso do setor de pavimentação se enquadra nesse escopo já que suas

infraestruturas consomem grandes quantidades de recursos naturais, em especial nas fases de construção, manutenção e operação (PLATI, 2019).

Indo ao encontro do desenvolvimento sustentável, é desejável que essas avaliações sejam realizadas nas esferas ambiental, econômica e social. A depender da ótica de avaliação, os mesmos fatores de entrada (exemplo: mão de obra; materiais; equipamentos; e energia consumida) gerarão diferentes saídas em uma mesma fase do ciclo de vida (VALDIVIA *et al.*, 2013, ZHENG *et al.*, 2019). Contudo, esse trabalho terá como enfoque o aspecto ambiental da sustentabilidade.

É nesse contexto que se insere a Análise de Ciclo de Vida (ACV). Os processos e regras para a realização de uma ACV foram originalmente definidas pela Organização Internacional de Padronização (ISO) em sua família de normas 14040 (ISO 2006b). Os critérios de conduta são genéricos já que visam orientar análises de qualquer tipo de empreendimento. Portanto, para sua aplicação em projetos de pavimentação são necessárias especificações mais precisas. Essa orientação é geralmente desenvolvida pelas indústrias relevantes e outras partes interessadas como academia e órgãos públicos (HARVEY *et al.*, 2014).

Existem vários métodos para se avaliar os impactos ambientais (AIA) de um determinado produto ou serviço (CRAWFORD *et al.* 2008). Entre os planejadores de transporte, tem crescido o interesse em determinar os impactos ambientais gerados por todas as etapas do ciclo de vida de infraestruturas de transportes, desde a extração até o descarte ou reciclagem dos materiais. Nesse sentido, a ACV tem ganhado destaque como a ferramenta mais apropriada para o cumprimento desse tipo de tarefa, já que é capaz da qualificação, quantificar e comparação das repercussões das estruturas estudadas. Em última instância, esse tipo de capacidade permite que a determinação do projeto a ser implantado seja feita de forma a se considerar ofensividade ao meio ambiente (AZARIJAFARI *et al.*, 2016).

2.2 Pesquisa bibliométrica sobre ACV

Como uma das formas de se demonstrar a relevância de um tema de estudo é por meio de uma pesquisa bibliométrica. Nesse sentido, realizou-se, no início desse trabalho, em 07/01/2019, uma investigação em três repositórios de documentos científicos para um período que começava no anos de 1970 e terminava em 2019 (não concluído), utilizando-

se as palavras-chaves e os operadores booleanos apresentados a seguir: “*Life*” AND “*Cycle*” AND “*Assessment*” AND “*Pavement*”. As bases de dados são apresentadas juntamente com as quantidades de artigos científicos publicados em periódicos, encontrados em cada uma: *Science Direct* (2493); *Scopus* (3873); *Web of Science* (359).

O processamento dos trabalhos coletados pode ser subdividido em três partes. Na primeira, com auxílio do programa *EndNote*, foram feitas: (1) a remoção dos trabalhos duplicados; (2) a exclusão dos trabalhos publicados em periódicos que não tinha classificação no *Journal of Citation Reports* (JCR). Com isso obteve-se um total de 2423 artigos publicados entre 1970 e 2019, apresentado na Figura 2-1. Pode-se notar que o tema de pesquisa é pesquisado a quase 50 anos, mas sofre um crescimento de quase 1000% entre os anos de 2010 e 2019.

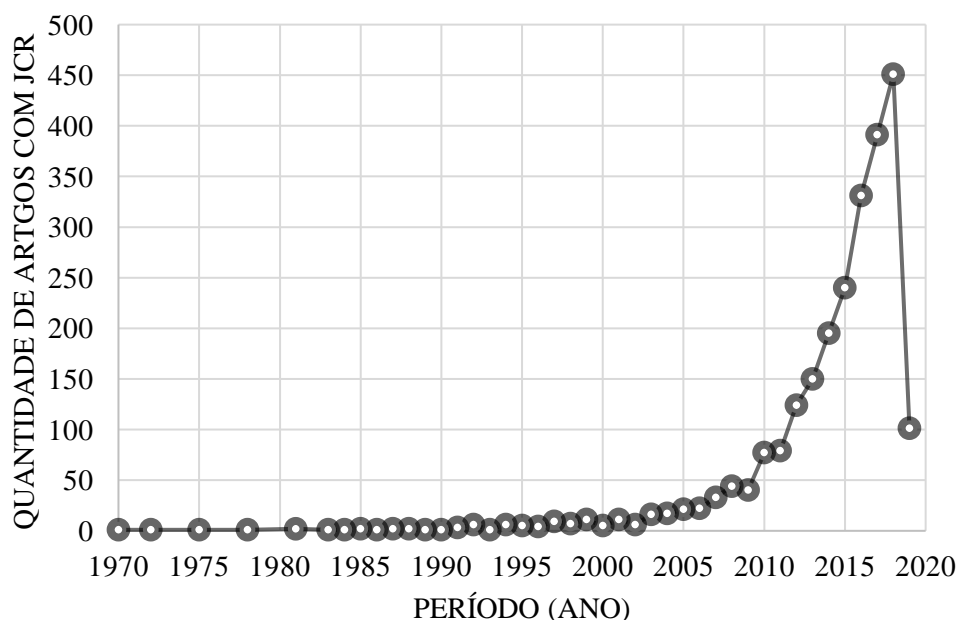


Figura 2-1 – Distribuição temporal dos artigos científicos publicados de 1970 a 2019 envolvendo as palavras-chave *Life*, *Cycle*, *Assessment* e *Pavement*.

A partir da segunda parte, focou-se no período de 2009 a 2019. O resultado pode ser observado nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figuras A.1 e A.2 presentes no APÊNDICE A, tópico A.7. Expõem-se os 25 principais periódicos em quantidade de publicações e os 27 autores que mais publicaram no período, respectivamente. Além disso, observa-se na Figura 2-2**Erro! Fonte de referência não encontrada.** algumas da palavras-chave que mais aparecem de pois das palavras

utilizadas no início da pesquisa. Desses vocábulos selecionou-se “*Asphalt*”, “*Sustainable*”, “*Sustainability*”.

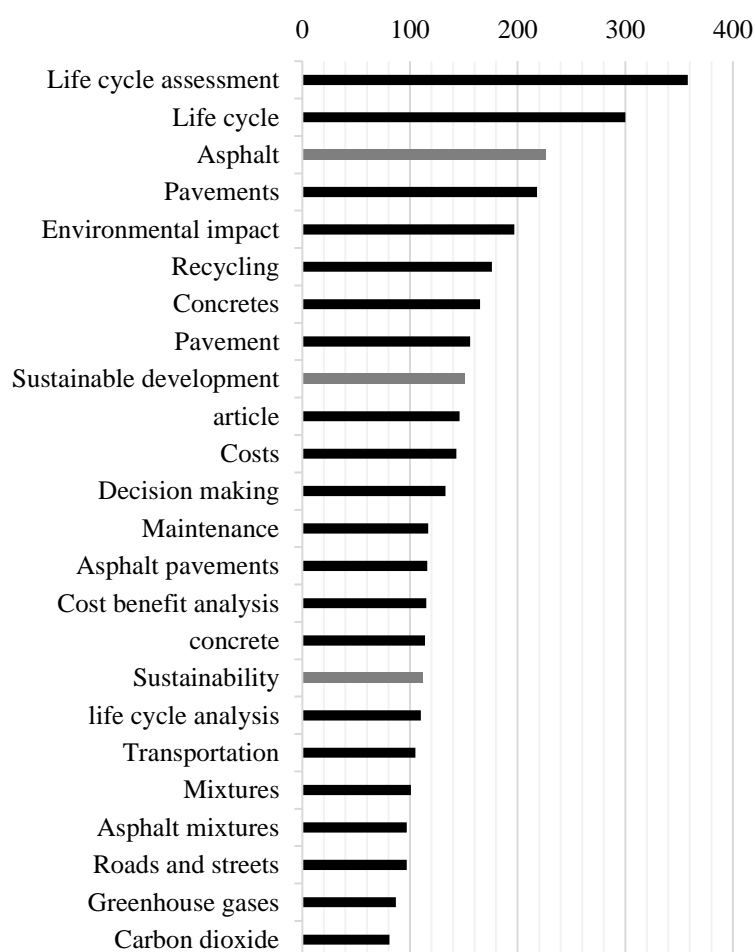


Figura 2-2 – Palavras-chaves encontradas nos artigos científicos publicados de 2009 a 2019 dentro dos trabalhos encontrados por meio da pesquisa das palavras-chave *Life*, *Cycle*, *Assessment* e *Pavement*.

Na última parte do tratamento dos trabalhos coletados e dentro do período de 2009 a 2019, realizou-se uma busca com as palavras-chaves e os operadores booleanos apresentados a seguir: “*Life*” AND “*Cycle*” AND “*Assessment*” AND “*Pavement*” AND “*Asphalt*”, AND “*Sustainable*”, AND “*Sustainability*”. Como resultado, obteve-se um conjunto de 215 trabalhos. Alguns dos periódicos com mais publicações são apresentados na Figura 2-3. No APÊNDICE A, tópico A.7, Figura A.3, pode-se verificar os autores com mais publicações da década. Após leitura dos títulos e resumos selecionou-se 56 artigos para serem lidos na íntegra como ponto de partida das pesquisas.

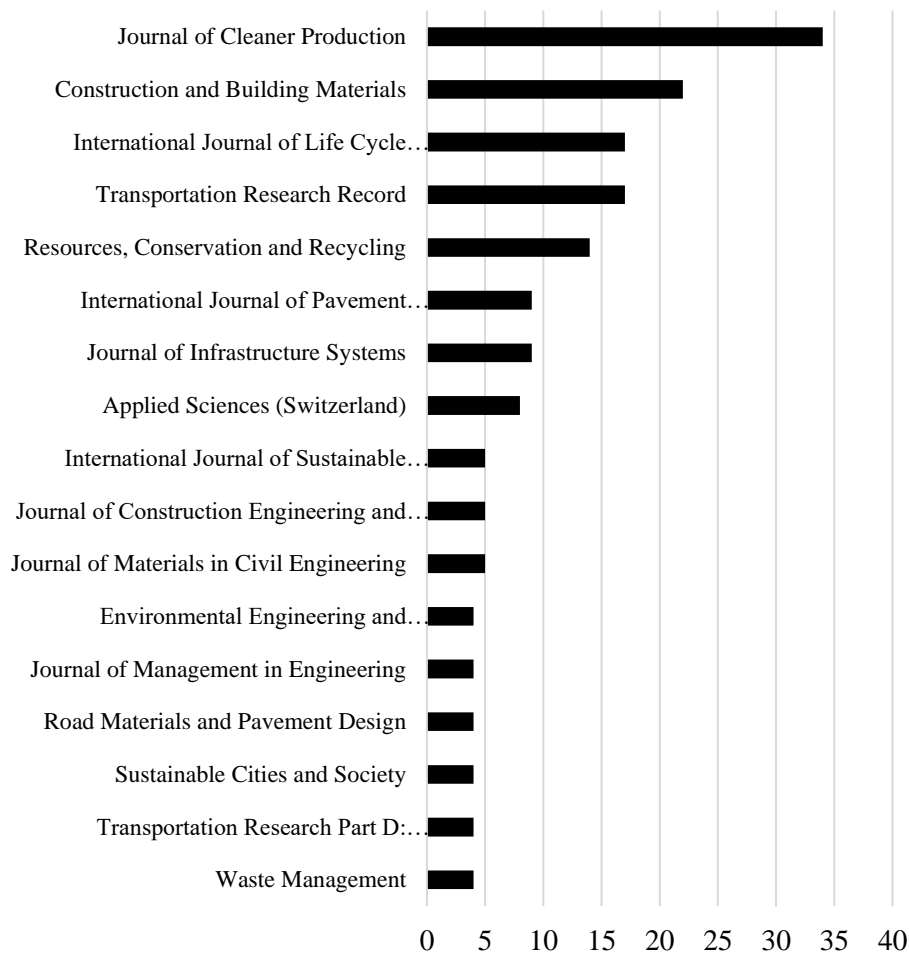


Figura 2-3 – Periódicos nos quais foram publicados os artigos científicos publicados de 2009 a 2019 dentro dos trabalhos encontrados por meio da pesquisa das palavras-chave *Life, Cycle, Assessment, Pavement, Asphalt, Sustainable, Sustainability*.

Considera-se que os resultados da pesquisa bibliométrica e o que foi exposto na revisão bibliográfica comprovam a crescente importância de estudos sobre Análise de Ciclo de Vida de pavimentos asfálticos.

2.3 Etapas da ACV

Segundo Hasan *et al.* (2019), pode-se descrever as etapas de uma ACV assim: (1) identificação dos processos, com o estabelecimento de períodos e abrangências, do ciclo de vida do produto contendo todas as variáveis, em unidades funcionais pertinentes, julgadas como necessárias para sua avaliação; (2) levantamento do inventário com os parâmetros de avaliação estabelecidos como necessários; (3) tabulação, quantificação e ponderações sobre as trocas energéticas com o meio ambiente, as emissões de resíduos e insumos consumidos; (4) interpretação, idealmente permeando todas as demais etapas da ACV com o objetivo principal de fornecer aos decisores informações para a conclusão de

que escolhas fazerem. A **Figura 2-4** apresenta uma representação gráfica da relação entre as etapas da ACV e sua interdependência.

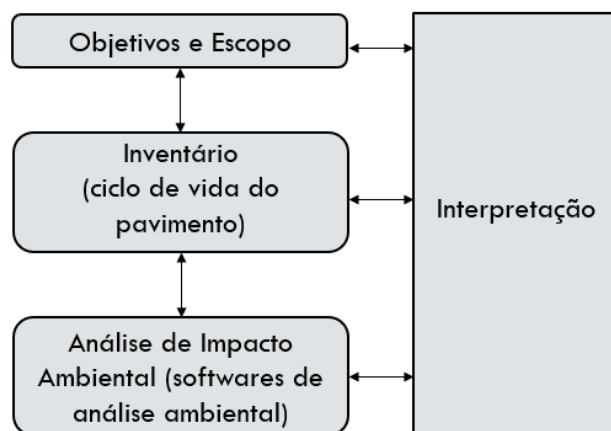


Figura 2-4 – Estrutura de uma Análise de Ciclo de Vida.

Fonte: Adaptado de (ISO, 2006a; ZHENG *et al.*, 2019).

2.3.1 Definição de objetivos e escopo da ACV

Essa fase consiste na determinação de parâmetros como: (1) unidades funcionais a serem utilizadas; (2) fronteiras do sistema a ser analisado; (3) período de avaliação; (4) especificações gerais. (1) As unidades funcionais são vinculadas a uma entrada ou saída específica, o que viabiliza a comparação entre os diferentes projetos, por exemplo, km de vias construídas por CO_2eq emitido. (2) Quanto as fronteiras do sistema, elas estabelecem diversos limites a serem considerados nos estudos, podendo sobrepor-se às demais fases. Algumas dessas bordas são: (a) as etapas do ciclo de vida; (b) os tipos de impactos a serem considerados; (c) as esferas de avaliação. (3) Outro aspecto importante é a definição do período pelo qual os ciclos de vida das alternativas serão examinados. Cabe ressaltar que no caso de pavimentos rodoviários, o período de análise pode fazer com que etapas de operação e manutenção tenham seus efeitos falseados. (4) Por último, tem-se a recomendação de descrição completa das fontes de dados, métodos e ferramentas utilizados para que sejam garantidas a reprodutibilidade, replicabilidade e auditoria dos estudos e avaliações (LI *et al.*, 2019; HASAN *et al.*, 2019)

2.3.2 Inventário do Ciclo de Vida

Um elemento fundamental de uma ACV é a elaboração de um Inventário do Ciclo de Vida (ICV), que é basicamente uma lista de entradas e saídas associadas a todas as etapas do ciclo de vida de um determinado produto (HAUSCHILD *et al.*, 2018). Existem três

abordagens mais difundidas para a elaboração de ICV. A primeira é conhecida como Análise de Processo ou *bottom-up approach*, em que o ciclo de vida do produto é segmentado em diversos subsistemas de produção. A segunda maneira é uma aproximação top-down, que é pautada em diagnósticos macroeconômicos através de Análises Insumo-Produto. Por último, tem-se um método que incorpora características dos dois procedimentos anteriores (CRAWFORD, 2011; HASAN *et al.*, 2019).

O método citado inicialmente tem vantagem em relação ao segundo, pois usa dados específicos do produto analisado, o que possibilita maior precisão do estudo. Contudo, ele não consegue realizar uma avaliação exaustiva do problema, em grande parte dos casos por questões de custo e tempo (CRAWFORD, 2008). Além disso, essa abordagem pode ser também afetada significativamente pela forma com que se desconsideram as informações (LENZEN, 2000).

De forma mais detalhada, o método de análise de processos, segundo (CRAWFORD, 2011), pode-se ter limites estabelecidos á montante, á jusante e lateralmente quanto ao ciclo de vida (CV) do produto. Os truncamentos progressivos dizem respeito a exclusão de etapas iniciais do CV em questão, sendo originados por razões de custo, tempo ou escassez de dados. Como exemplo tem-se a extração de alguma matéria prima. O segundo tipo de restrição refere-se a omissão de etapas intermediárias dos processos do CV, comum em processos compostos por uma grande quantidade de passos. A última espécie de continência aborda a exclusão de estágios que têm suas contribuições consideradas insignificantes para a análise do CV.

Mesmo sendo um método capaz de abarcar, de forma elegante, um número quase infinito de etapas de um processo produtivo, a Análise de Insumo-Produto padece de incertezas que podem comprometer as avaliações. As fontes desses erros são: (1) amostragens, relatórios e imputações; (2) extrapolações regionais a partir de parâmetros locais; (3) suposição de existência de homogeneidade entre produtores; (4) estimativa de fluxos de capital; (5) assunção de proporcionalidade entre fluxos físicos e monetários; (6) agregação de operações sobre diferentes produtores; (7) truncamento de etapas (LENZEN, 2000).

Apesar de parecer uma abordagem mais direta e intuitiva, o uso de uma análise de processos não é suficiente para descrever de forma satisfatória o CV de produtos

complexo com é o caso de grandes infraestruturas como estradas que reúnem vários materiais e etapas ao longo de seus CV. Esse aspecto é de tal relevância que as lacunas podem ser da ordem de 87%. Com isso, a complementação dos dados com auxílio de matrizes insumo produto é recomendada, mesmo com sua eficácia não comprovada (CRAWFORD, 2008).

O terceiro método utilizado para a elaboração de um ICV, é um híbrido composto pela união do método de análise de processos e Análise Insumo-Produto. Contudo, existem mais, pelo menos, quatro formas de diferentes de se mesclar as duas abordagens, as quais devem ser explicitadas. A Figura 2-5 apresenta um espectro que demonstra o quanto cada um dos quatro tipos de métodos híbridos do ICV se aproxima dos dois métodos primários, que, por sua vez, encontram-se diametralmente opostos (CRAWFORD *et al.*, 2018).

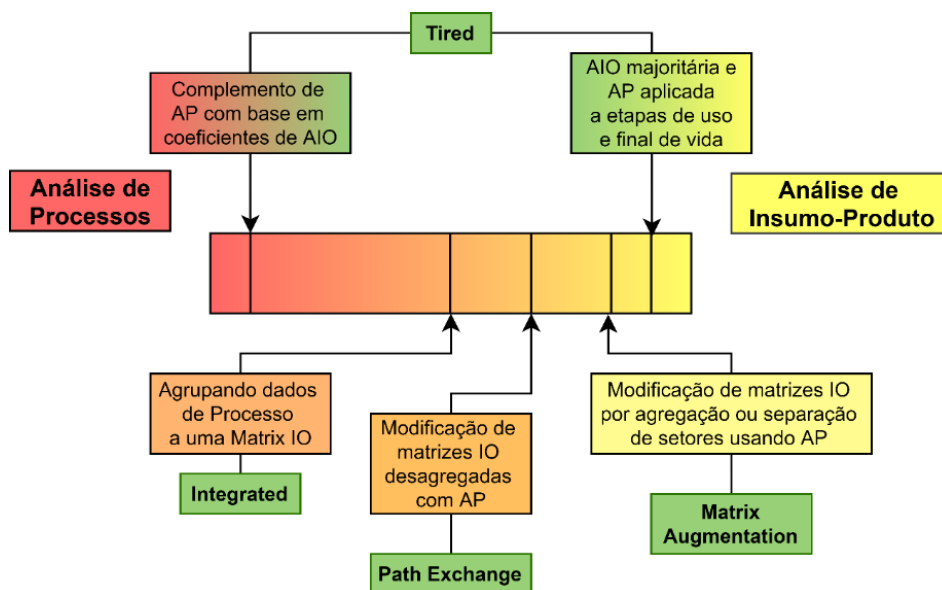


Figura 2-5 – Ilustração da relação de proximidade entre os tipos de LCI.

Fonte: Adaptado de (CRAWFORD *et al.*, 2018).

Ao longo dos anos, diversos pesquisadores tentaram desenvolver métodos para superar os problemas e limitações presentes nos dois métodos opostos. Contudo, as quatro técnicas mais utilizadas são métodos híbridos da dupla inicial, ou seja, combinações deles. Seus nomes são: (1) *TIERED*; (2) *PATH EXCHANGE* (PXC); (3) *MATRIX AUGMENTATION*; (4) *INTEGRATED* (CRAWFORD *et al.*, 2018).

O método (1) *TIERED* combina a Análise de Processos (AP), sua técnica inspiradora, e a Análise de Insumo Produto (AIP) com a premissa de expandir as fronteiras de análise da primeira abordagem. Devido a capacidade de representatividade de cada método, é comum se observar uma maior utilização da AIP nas etapas de produção dos produtos, enquanto os estágios do final do CV são mais influenciados pelo AP. Outra forma também adotada, é a de se realizar uma AP e preencher as lacunas com uma AIP (BULLARD *et al.* 1978; CRAWFORD *et al.*, 2018). Mesmo usando o melhor da AP e da AIP algum nível de truncamento é necessário, fazendo com que algum processo seja excluído da análise, além disso, há um risco de dupla contagem, onde não se consegue exatidão na determinação dos limites entre uma representação por AP ou por AIP (SUH e HUPPES, 2005).

A abordagem (2) *PATH EXCHANGE* (PXC), é fundamentada na AIP e consiste em uma desagregação matemática das Matrizes Insumo Produto (MIP), possibilitando a identificação e modificação de caminhos mutuamente excludentes, o que permite uma maior precisão da análise de cadeias de suprimentos de produtos e serviços por meio do preenchimento de lacunas. A quantidade de dados e passos a serem analisados e executados gera um grau de complexidade que têm dificultado sua disseminação. (TRELOAR, 1997; LENZEN e CRAWFORD, 2009; CRAWFORD *et al.*, 2018)

A abordagem (3) *MATRIX AUGMENTATION* (MA), também pautada na AIP, é uma técnica que consiste na modificação dos setores da economia, seja adicionando ou dividindo setores, de forma que as relações de produção e consumo fiquem mais evidentes e precisas. Esse método é mais utilizado nos casos em que se deseja estudar a influência de novos produtos ou serviços. As duas aplicações têm o objetivo de reduzir o efeito das agregações presentes na AIP convencional. Contudo, existem dois problemas, quais sejam: (1) modificações nos setores podem ter efeitos indesejáveis em várias etapas ou não atingir a agregação dos diversos níveis e setores; (2) a suposição de similaridade nas estruturas de produção e consumo entre os setores preexistentes e criados (JOSHI, 1999; CRAWFORD *et al.*, 2018).

O método (4) *INTEGRATED*, pautados na AIP, agrega a AP por meio de uma única matriz de tecnologia que é conectada, através de vetores, a uma tabela de entradas e saídas com interações das diversas etapas do CV de um produto ou serviço e acoplando-as por meio de vetores. Seu principal objetivo é minimizar o truncamento sistemático da

AP, para isso, o corte a montante é usado para representar insumos que surgem de setores econômicos em que não existem disponibilidade de dados do processo, já corte a jusante representa as vendas de bens e serviços da tecnologia matriz para outros setores econômicos. Uma forma de descrever o modelo é através da ampliação de uma MIP com uma matriz de processos. Existem dois riscos principais que esse método apresenta, são eles: a possibilidade de dupla contagem relacionada a união das duas matrizes, problema que se evita com mais facilidade no método MT e PXC; e a demanda por grandes quantidades de tempo e dados para sua implementação (BABOULET, 2009; CRAWFORD *et al.*, 2018).

2.3.3 Análise de Impacto do Ciclo de Vida

A fase de Análise de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) presta-se a tradução dos fluxos elementares, presentes no inventário, em pegadas ou impactos ambientais. Essa etapa tende a ser altamente automatizada com possibilidade de utilização de diversos *softwares* a depender do produto analisado e dos impactos que se deseja verificar (HAUSCHILD *et al.*, 2018).

Segundo CONAMA (1986) impacto ambiental é qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas, seja de forma direta ou indireta, que venham modificar alguns aspectos como: a saúde, a segurança, e o bem-estar da população; atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais.

Hauschild *et al.* (2018) definem impacto ambiental como um conjunto de mudanças ambientais, benéficas ou malélicas, geradas pela ação humana. Tais impactos são estudados e avaliados por meio de diversos métodos e ferramentas aplicados nos fluxos materiais e energéticos de cada etapa do ciclo de vida do produto de interesse. De forma mais explícita, o que a AICV faz é aplicar um modelo de mecanismo ambiental que considera cada um dos impactos ambientais de interesse em uma cadeia causa-efeito que termina com uma emissão ou qualquer outra intervenção. Um exemplo da importância de se converter emissões diretas de uma tonelada de um gás qualquer em Dióxido de Carbono Equivalente é a diferença do potencial de contribuição para o Efeito Estufa (EE) do gás Dióxido de Carbono (CO_2) e o gás Metano (CH_4). Essa conversão

possibilita a comparação de diferentes substâncias sob a ótica do potencial de aquecimento global.

Nesse momento, é pertinente ressaltar-se que os resultados da AICV são indicativos dos potenciais de impacto, não sendo adequado que sejam interpretados como previsões dos efeitos ambientais, limites máximos ou margens de segurança a serem evitados. Algumas razões que embasam essas ressalvas são: (1) interdependência espacial e temporal dos efeitos que as ações causarão no ambiente; (2) possíveis falhas na detecção de ocorrência simultânea de outros sistemas produtivos (HAUSCHILD *et al.*, 2018).

Outro aspecto importante é a terminologia específica, segundo ISO (2006b) e EC-JRC (2010a), que será apresentada a seguir:

- **Área de proteção (*Area of Protection*):** Conjunto de Categorias de Impacto que possui reconhecido valor para a sociedade. Podem ser citados: Saúde humana; recursos naturais; meio ambiente.
- **Indicador de Categoria (*Category indicator*):** representante quantificável de uma categoria de impacto;
- **Categoria final (*Category endpoint*):** atributo ou aspecto do meio ambiente ou saúde humana ou oferta de recursos que identifique um tema de preocupação;
- **Modelo de Caracterização (*Characterization model*):** mecanismo ambiental que descreve a relação de causalidade entre os resultados AICV, Indicadores de Categoria e Categoria de Impacto;
- **Fatores de Caracterização (*Characterization fator*):** convertem os parâmetros do ICV para as unidades dos Indicadores de Categoria;
- **Fluxo elementar (*Elementar Flow*):** matéria ou energia, sem transformação, que entra no sistema produtivo em análise ou matéria ou energia que sai do sistema produtivo estudado para o meio ambiente sem sofrer processamento;
- **Impacto Ambiental (*Environmental Impact*):** impacto potencial em áreas como no meio ambiente, saúde humana, oferta de recursos naturais, que tenham sua origem na ação humana. Essas intervenções podem ser causadas por emissões, exploração de recursos naturais, uso da terra, etc;
- **Mecanismo Ambiental (*Environmental mechanism*):** sistema composto de processos físicos, químicos e biológicos que se desenrolam em uma dada

categoria de impacto. Ele relaciona e demonstra como os parâmetros do ICV se relacionam com os indicadores de categoria e categoria final;

- **Relevância Ambiental (*Envinment Relevance*):** grau de relevância entre o indicador de categoria e a categoria final;
- **Categoria de impacto (*Impact Category*):** classe que representa um conjunto de preocupações ambientais que se pretende verificar o que sofre sob a influência do sistema produtivo avaliado pela ACV;
- **Método AICV (*LCIA method*):** coleção de modelos de caracterização individuais, em que cada um deles se presta à avaliação de diferentes categorias de impactos;
- **Indicador Intermediário (*Midpoint Indicator*):** indicador de performance que ser utilizado como parâmetro de comparação ou otimização do sistema de produção.

Existem passos que devem ser implementados para que se desenvolva uma AICV. Alguns deles são obrigatórios: (1) seleção de categorias de impactos, categorias de indicadores e modelos de caracterização; (2) Classificação, isto é, associação dos fluxos com seus efeitos potenciais; (3) Caracterização, em outros termos, cálculo dos indicadores das categorias, quantificação das contribuições dos fluxos do inventário nas diferentes categorias de impactos. Majoritariamente, esses passos ocorrem no momento da escolha do *software* de ACV. As etapas opcionais, não aprofundadas nesse trabalho, são: (a) Normalização; (b) Definição de pesos para priorização de impactos, por exemplo; (c) Agrupamento (ISO, 2006b).

2.3.3.1 Categorias de Impactos, Indicadores e modelos de Caracterização

A seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização devem estar em consonância com os objetivos estabelecidos para a ACV. Na ISO 14044 (ISO 2006b), existe um conjunto de parâmetros para selecioná-las, quais sejam: (a) não redundância; (b) não mascarar impactos significantes; (c) completa abordagem dos impactos; (d) permitir rastreabilidade.

Na prática, indicadores de categorias baseados em modelos de caracterização específicos são combinados em um conjunto de métodos, muitas vezes associados a métodos de AICV. Com o aumento da oferta de métodos de AICV e indicadores de

viabilidade, a tarefa de escolher um, em última análise, passa pelo entendimento do usuário sobre as características dos métodos disponíveis e sobre os avanços na área da ACV (EC-JRC, 2011; HAUSCHILD *et al.*, 2018).

O risco de qualquer impacto ambiental surge da interação entre o perigo (desencadeado por um evento ou tendência relacionada), a vulnerabilidade (susceptibilidade a danos) e a exposição (pessoas, ativos ou ecossistemas em risco). Os processos iniciados podem ser de curta ou longa duração, bem como serem desencadeados de forma instantânea ou de retardada. Quanto a vulnerabilidade e a exposição, aspectos ambientais, econômicos e sociais podem ser afetados a depender das vias de desenvolvimento. Os riscos podem ser analisados de maneira quantitativa e qualitativa. Contudo, a eficácia do gerenciamento de riscos de impactos ambientais não necessita, obrigatoriamente, que os níveis de risco sejam quantificados de forma precisa, uma vez que a determinação de critérios qualitativos, objetivos e prioridades pode ser realizada com base em princípios éticos, psicológicos, culturais ou sociais (IPCC 2014).

Nessa etapa os fluxos elementares do ICV são associados às categorias de impacto. Por exemplo, emissões de CO_2 associadas a mudanças climáticas. Essa etapa requer bastante cuidado, pois algumas emissões podem interferir em mais de um impacto. Por isso, é necessária compressão e atenção a detalhes nas formas de como os impactos ambientais podem ser afetados. Devido ao grau de complexidade, essa tarefa não deveria estar sob a tutela dos usuários dos métodos de AICV, mas sim dos desenvolvedores da ferramenta e implementadores dos mecanismos de danos ao meio ambiente (HAUSCHILD *et al.*, 2018).

Segundo Hauschild *et al.* (2018), a fase em questão se caracteriza pelo fato de todos os fluxos elementares no ICV são avaliados de acordo com a intensidade com que contribuem para um dado impacto. Para isso, todos os fluxos elementares (E), classificados dentro de uma categoria de impacto (CI) específica, são multiplicados por seus respectivos fatores de caracterização (CF) e somados todas as intervenções relevantes (I) (emissões ou extrações de recursos), resultando em uma pontuação de impacto (IS) para a categoria de impacto (expressa em uma unidade específica igual para todos os fluxos elementares dentro da mesma categoria de impacto). Para cada categoria de impacto, os resultados do indicador são somados para determinar os resultados gerais

para a categoria. Nas seções a seguir, os princípios gerais de como os CFs são calculados e interpretados serão discutidos. Para as categorias de impacto mais estudadas em ACV de rodovias, a fim de fornecer uma melhor compreensão do que os CF representam e como eles são derivados será apresentado, para cada categoria de impacto, explicação do correspondente (1) problema observado; (2) mecanismo ambiental principal; (3) causas principais; e (4) modelos de caracterização mais utilizados.

Adentrando um pouco mais sobre a natureza dos fatores de caracterização (CF), entende-se que estes representam a contribuição por quantidade de um fluxo elementar para um impacto ambiental específico. É calculado usando modelos (cientificamente válidos e quantitativos) do mecanismo ambiental representando tão realisticamente quanto possível a cadeia de causa e efeito de eventos que levam a impactos no meio ambiente para todos os fluxos elementares que contribuem para este impacto. A unidade de um CF é a mesma para todos os fluxos elementares dentro de uma categoria de impacto. É definido pelos desenvolvedores do modelo de caracterização e pode expressar o impacto diretamente em termos absolutos (por exemplo, número de casos de doenças / emissão tóxica unitária) ou indiretamente, relacionando-os ao impacto de um fluxo elementar de referência (por exemplo, quantidade de CO_2 equivalente emitido) (HAUSCHILD *et al.*, 2018).

Para Hauschild *et al.* (2018), a modelagem de um fator de caracterização envolve o uso de diferentes modelos e parâmetros e é normalmente conduzido por especialistas para uma determinada categoria de impacto e sua via de impacto ou mecanismo ambiental subjacente. Várias suposições e escolhas metodológicas estão envolvidas e isso pode afetar o resultado conforme refletido nas diferenças nos resultados que podem ser observados para a mesma categoria de impactos ao aplicar diferentes métodos de AICV. Isso deve ser considerado quando for o momento de se interpretar os resultados da fase de AICV. A primeira etapa ao estabelecer uma categoria de impacto é a observação de um efeito adverso preocupante no meio ambiente, conseqüentemente a necessidade de processos mais sustentáveis. A base e o ponto de partida de qualquer modelo de caracterização são sempre o estabelecimento de um mecanismo ambiental representado por uma causa-efeito corrente. O seu ponto de partida é sempre a intervenção ambiental (representada por fluxos elementares), essencialmente de dois tipos, quais sejam: (1) uma emissão para o meio ambiente; (2) uma extração de recursos do meio ambiente.

Segundo Hauschild *et al.* (2018), para impactos gerados por emissões, a cadeia de causa-efeito genérica mais provável, que constitui o mecanismo ambiental da categoria de impacto e seus recursos específicos, é apresentada a seguir:

- Emissão: para o ar, água ou solo;
- Destino: processos ambientais que causam dispersão e transformação da substância emitida no meio ambiente. A depender das características físico-químicas da substância e das condições do local da emissão, uma substância pode ser transportada para diferentes ambientes, percorrendo longas distâncias por meio do vento ou da água corrente. Além disso, pode passar por processos de degradação ou de alteração de suas estruturas químicas;
- Exposição: contato da substância com um alvo sensível como animais e plantas, ecossistemas inteiros ou humanos. A exposição pode envolver processos como inalação de ar, ingestão de alimentos e água ou contato dérmico através da pele e outras superfícies;
- Efeitos: efeitos adversos observados no alvo sensível após a exposição a substância. Como exemplo, pode-se citar aumento: do número de casos de doença, fatais ou tratáveis, por unidade ingerida em uma população humana; do número de espécies afetadas quanto ao comportamento, mobilidade e reprodução após a exposição de um ecossistema;
- Danos: distinguir a gravidade dos efeitos observados, quantificando a quantidade de espécies com potencial de desaparecer de um ecossistema. Quanto à saúde humana, dando mais peso à morte e a problemas irreversíveis do que problemas temporários reversíveis.

De acordo com Hauschild *et al.* (2018), o que diz respeito a impactos ocasionados por extrações, a cadeia de causa-efeito genérica mais provável, que constitui o mecanismo ambiental da categoria de impacto e seus recursos específicos, é apresentada a seguir:

- Extração ou uso: por exemplo de minerais, petróleo bruto, água ou solo;
- Destino: mudanças nas condições locais do meio ambiente, como: permeabilidade do solo; nível do lençol freático; albedo do solo; liberação de carbono armazenado;
- Exposição: alterações na quantidade disponível, na qualidade ou funcionalidade de um recurso e competição potencial entre vários usuários

(humanos ou ecossistemas, com diferentes graus de capacidade para se adaptar e / ou compensar). Alguns exemplos são: perda de habitat; estresse por desidratação; queda na produtividade biótica do solo;

- Efeitos: efeitos adversos a usuários diretamente afetados por serem incapazes de se adaptar ou compensar, por exemplo, a baixa qualidade ou oferta de água, gerando migrações, desnutrições e morte de espécies. Outro ponto é a contribuição para outras vias de impacto, tal como, aquecimento global devido à mudança no albedo do solo;
- Danos: distinguir a gravidade dos efeitos observados, quantificando a redução da biodiversidade ou saúde humana de uma população afetada.

Embora possam ter características específicas a depender da categoria do impacto, o princípio permanece válido para todos os impactos relacionados à extração categorias, sendo:

- Uso da terra: capaz de afetar a produtividade biótica; recarga de aquíferos; sequestro de carbono; albedo; erosão; capacidade de filtração mecânica e química; biodiversidade;
- Uso da água: com potencial para abalar a saúde humana; ecossistemas aquáticos; ecossistemas terrestres;
- Uso de recursos abióticos (fósseis e minerais): detentor de capacidade para inviabilizar a disponibilidade futura dos recursos abióticos não renováveis;
- Uso de recursos bióticos: por exemplo, pesca ou extração de madeira, que têm poder frustrar a exploração futura dos recursos bióticos renováveis e dos ecossistemas dos quais são retirados.

2.3.4 Indicadores de Impacto Ambiental

Para Hauschild *et al.* (2018), a definição do mecanismo ambiental passa pela determinação da forma com que um fluxo elementar influencia uma categoria de impacto e a intensidade com que esse fluxo é capaz de afetar um indicador da categoria de impacto que é selecionada ao longo da cadeia de causa-efeito. Além de ser necessário considerar a viabilidade da modelagem do indicador, esta seleção deve ser orientada também pela relevância ambiental do indicador. Os desenvolvedores devem chegar a um acordo quanto a forma de escolher um indicador de impacto: (1) um mecanismo ambiental, por meio de

previsões laboratoriais, por exemplo, mas com menos relevância ambiental e mais distância das preocupações diretamente observáveis no ambiente; (2) um mecanismo ambiental, dando mais relevância ao observado no campo, mas que apresenta dificuldades na verificação de informações como, por exemplo, de ecossistemas degradados, vida humanas afetadas. Essas diferenças levaram ao estabelecimento de dois tipos diferentes de categorias de impacto, com indicadores em dois níveis diferentes para os mecanismos ambientais: (1) indicador intermediário de impacto; (2) indicador final de impacto. Adiante agora a informação de que não existe uma relação de exclusão entre os dois tipos de abordagem, mas sim de complementação de informações de diferentes aspectos que, em última instância, servirão para embasar a melhor interpretação possível dos fatos.

Conforme EC-JRC (2010b) e Huijbregts *et al.* (2017), quando a avaliação de impacto é baseada em indicadores de impactos intermediários, a classificação reúne os resultados do inventário em grupos de fluxos de substâncias que têm o potencial de contribuir para um mesmo efeito ambiental, aplicando os fatores de caracterização que foram desenvolvidos para a categoria de impacto. Por exemplo, todos os fluxos elementares de substâncias que podem ter um efeito carcinogênico em humanos serão classificados na mesma Categorias de impactos intermediários chamado de "carcinógeno tóxico" e a caracterização calculará sua contribuição para este impacto.

Ainda de acordo com EC-JRC (2010b) e Huijbregts *et al.* (2017) os elementos de modelagem adicionais são usados para expandir ou vincular indicadores de impacto intermediários a um ou mais indicadores de impacto finais. Esses são representativos de diferentes tópicos ou Áreas de Proteção de interesse para a sociedade em relação ao ser humano saúde, ecossistemas ou funções de suporte à vida planetária, incluindo serviços de ecossistema e recursos, por exemplo. Conforme discutido, os indicadores de impacto finais são escolhidos posteriormente na cadeia de causa-efeito do mecanismo ambiental mais próximo do ponto final das cadeias. Portanto, os indicadores de impacto intermediários contribuem com parte dos indicadores de impacto finais. Segundo Ridoutt *et al.* (2015), diferentes denominações e considerações são possíveis e existentes, contudo, os indicadores de impacto finais típicos são:

- Saúde humana;
- Qualidade do ecossistema ou ambiente natural;
- Recursos naturais e serviços ecossistêmicos.

A Figura 2-6 apresenta um esquema da tradução dos fluxos elementares nos diversos tipos de impactos intermediários. Por sua vez, têm seus efeitos distribuídos no que são os chamados grupos de mecanismos de ação e esses são percebidos nos impactos finais, ou seja, nas áreas de proteção.

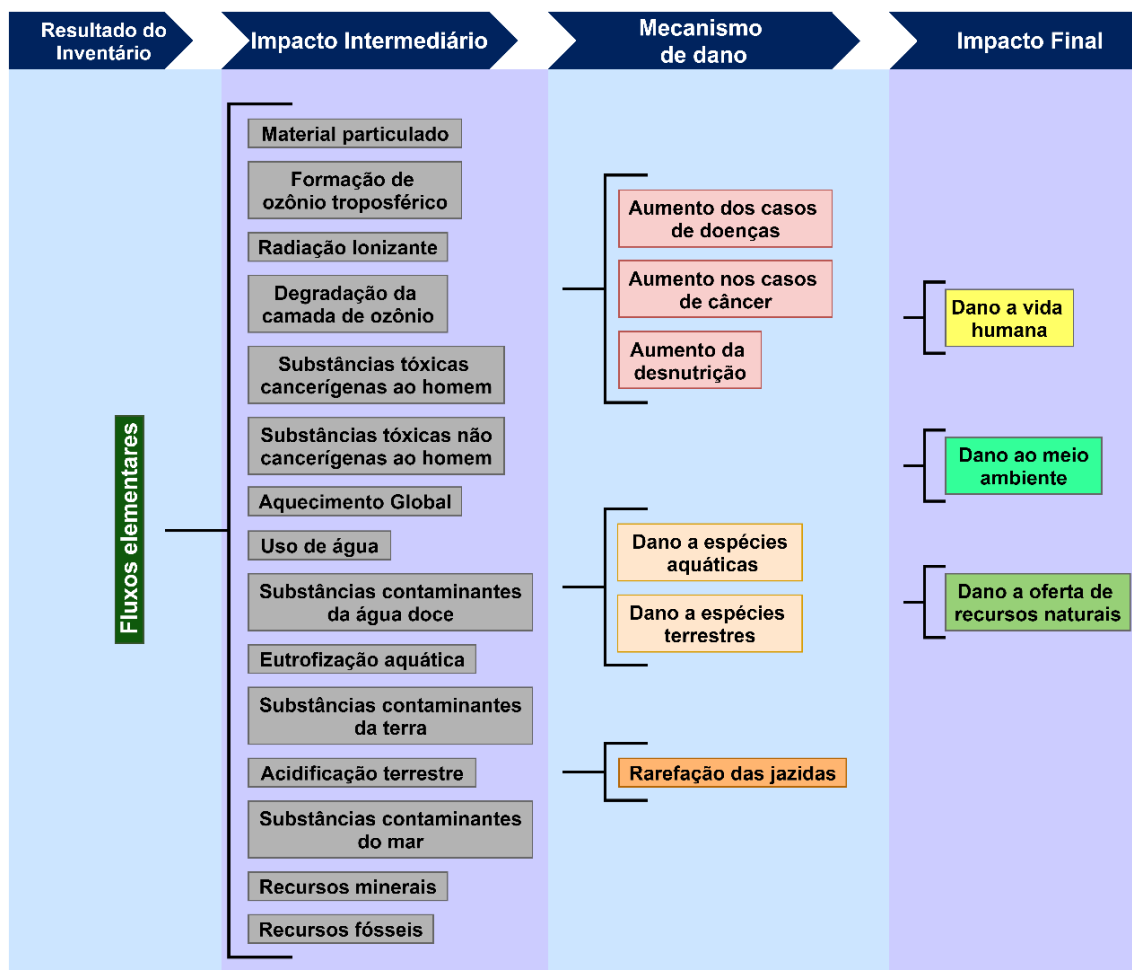


Figura 2-6 – Ilustração da relação entre os fluxos elementares, impactos intermediários e finais.

Fonte: Adaptado de EC-JRC, (2010b); RIDOUTT *et al.* (2015); HUIJBREGTS *et al.* (2017), HAUSCHILD *et al.* (2018); VEGA ARAUJO *et al.* (2020).

Contudo, existem outras maneiras menos formais de se qualificar e quantificar os efeitos ambientais que os processos envolvidos no ciclo de vida de um empreendimento podem causar. Uma delas são as pegadas ambientais. Suas características gerais são apresentadas a seguir.

Para Hauschild *et al.* (2018), pegadas ambientais são uma outra forma, menos abrangente e até mesmo técnica, de indicar os danos feitos ao meio ambiente. Devido a sua simplicidade de utilização e de compreensão, é largamente adotada. Seu emprego é

mais adequado em situações como: (1) início de estudos ambientais, para verificar a profundidade dos possíveis problemas e justificar avaliações mais abrangentes como ACV; (2) necessidade de se mostrar a relevância de problemas ambientais para o público leigo. Em função do escopo estreito das pegadas ambientais e representatividade limitada para um conjunto abrangente de indicadores ambientais, elas não são as ferramentas mais adequadas para suporte à tomada de decisão.

Suas desvantagens passam por questões como: (1) a simples determinação da quantidade necessária de um determinado recurso no processo produtivo, por exemplo, demanda energética e consumo de água; (2) não associação das emissões e extrações com os impactos que podem essas gerar no meio em que ocorrem; (3) a associação de diferentes pegadas ambientais costuma ser inviável devido a diferenças nas fronteiras de determinação, o que pode favorecer dupla contagem ou exclusão de alguma fator importante, gerando viés (RIDOUTT *et al.*, 2015; HAUSCHILD *et al.*, 2018).

A Figura 2-7 é uma representação gráfica da diferença do que um estudo que utiliza uma abordagem de ACV, que considera de forma integrada os efeitos de cada etapa de um possível ciclo de vida de um pavimento rodoviário, gera como resultado, e um estudo que adota uma abordagem que visa considerar separadamente os efeitos ambientais.

Como o foco desse trabalho está alinhado com a determinação de impactos gerados pelas emissões feitas para o meio ambiente durante o ciclo de vida de pavimentos rodoviários, a seguir serão apresentadas maiores informações sobre os impactos ambientais associados a esse tipo de intervenção.

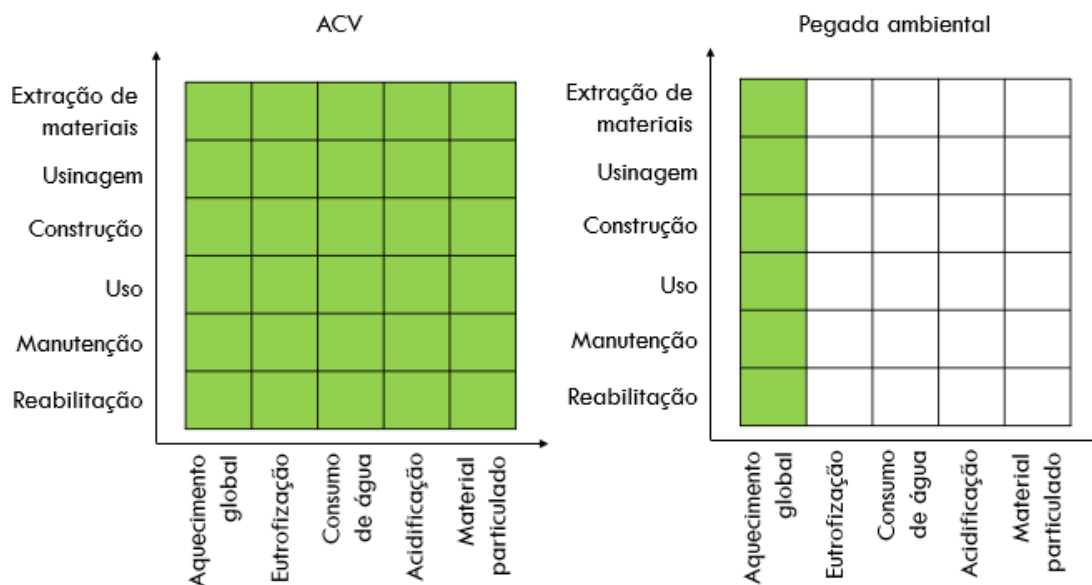


Figura 2-7 – Diferença entre estudos que utilizam uma abordagem de Análise de Ciclo de Vida e que adotam métodos para determinação de Pegadas Ambientais.

Fonte: Adaptado de (EC-JRC, 2010b; HAUSCHILD *et al.*, 2018).

2.3.4.1 Alterações Climáticas

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) entende que as mudanças climáticas devem ser entendidas como uma mudança no estado do clima da Terra e que podem ser identificadas por meios de verificações de mudanças que persistem por, pelo menos, uma década na média ou na variabilidade de suas propriedades (IPCC, 2014).

Uma forma de descrever o mecanismo de entrada, retenção e saída da energia na Terra é exposto a seguir. Primeiramente, a energia irradiada pelo Sol atinge a atmosfera da Terra. Aproximadamente 28% dessa energia é refletida diretamente de volta ao espaço por moléculas de ar, nuvens e a superfície da terra (particularmente oceanos e regiões geladas, como o Ártico e a Antártica). A esse fenômeno dá-se o nome de albedo. 21% do que restou da energia recebida é absorvida pela atmosfera por meio de gases de efeito estufa (GEE) e a superfície da Terra absorve outros 50%. A parcela que foi retida aquece a superfície planetária. Posteriormente esse calor é liberado de volta para a atmosfera na forma de radiação infravermelha, que possui comprimento de onda maior do que a radiação absorvida. Esta radiação infravermelha é parcialmente absorvida pelos GEE e, conseqüentemente, mantidos na atmosfera em vez de serem liberados no espaço. O mecanismo apresentado explica o aumento da temperatura local à medida que crescem as

concentrações de GEE, e conseqüentemente, da temperatura global (HAUSCHILD *et al.*, 2018).

GEE são gases que têm a capacidade de absorver energia e, em escala global, como citado anteriormente, podem reduzir as perdas de calor para o espaço aumentando as médias de temperatura. Cada GEE possui um potencial de interferência diferente, que varia em função de seu potencial de armazenar energia (eficiência radioativa) e de seu potencial de permanecer na atmosfera (vida útil). Uma forma criada para lidar com essas questões e possibilitar a comparação de diferentes tipos e quantidades de GEE foi o estabelecimento do Potencial de Aquecimento Global (GWP). Uma unidade desse indicador tem como parâmetros, estabelecidos de forma arbitrária, a quantidade de energia que uma tonelada de dióxido de carbono (CO_2) pode absorver em um dado período em anos. Diversos GEE são gerados por uma variedade de processos agrícolas e industriais dentre os quais: criação de gado; queima de combustíveis fósseis; decomposição de resíduos sólidos; fabricação de produtos de madeira; e produção de agentes aglutinantes como cimento Portland e asfalto. Contudo, mais de 98% das toneladas emitidas é composta por (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) (IPCC, 2014; VAN DAM *et al.*, 2015). A seguir, apresenta-se a Tabela 2.1 com informações sobre os GWP desses gases.

Tabela 2.1 – Contribuições relativas dos principais GEE para o incremento do Efeito Estufa.

Substância	Vida útil	GWP	
		Efeito cumulativo (20 anos)	Efeito cumulativo (100 anos)
CO_2	indeterminado	1	1
CH_4	12,4	84	28
N_2O	121,0	264	265
CF_4	50.000,0	4880	6680

Fonte: adaptado de (IPCC, 2014).

2.3.4.2 Normalização e Ponderação

Segundo Hauschild *et al.* (2018), as quantidades estimadas ou aferidas para os diferentes indicadores de impactos ambientais intermediários são expressas em unidades padrão. Para isso é necessário traduzir as quantidades dos diferentes agentes de um dado impacto para um padrão. Por exemplo, os diferentes gases de efeitos estufa sendo representados por quantidades equivalentes de dióxido de carbono. Outra questão que

deve ser resolvida é decidir quais montantes são grandes e quais são pequenos. A fim de viabilizar tais comparações, é preciso colocá-las em perspectiva, e esse é o propósito de a etapa de normalização. Nele os impactos potenciais do sistema de produto são comparados aos de um sistema de referência como o mundo, país ou um setor industrial em uma dada condição estabelecida como parâmetros padrão, podendo ter especificações como: período em que o impacto deve ser considerado; e quantidades máximas aceitáveis.

Ainda de acordo com Hauschild *et al.* (2018), por meio da relativização dos diferentes impactos potenciais a uma escala comum, expressos em uma unidade padrão, é possível conceber uma ordem de grandeza de comparação para os impactos ambientais em relação ao sistema de referência. Isso posto, a normalização pode ser útil para: (1) proporcionar uma impressão das magnitudes relativas do impacto ambiental potenciais; (2) apresentar os resultados em uma forma adequada para uma ponderação subsequente; (3) controlar a consistência e a confiabilidade; (4) comunicar resultados. As referências típicas são: (a) zona geográfica que pode ser global, continental, nacional, regional ou local; (b) habitante de uma zona geográfica (por exemplo, expressando o "espaço ambiental" ocupada por pessoa média); (c) cenário de referência de linha de base, como outro sistema de produto (por exemplo, expressando o "espaço ambiental" ocupado por este sistema de produto em relação a um similar sistema de referência usando a melhor tecnologia disponível).

Na prática, um método AICV geralmente fornece fatores de normalização para uso com seus fatores de caracterização. Os fatores de normalização são calculados usando os mesmos fatores de caracterização para o inventário de referência usados para o inventário do sistema de produto. Fatores de normalização de diferentes AICV métodos, portanto, não podem ser misturados ou combinados com fatores de caracterização de outro método AICV. Isso significa que, como um praticante de ACV, fica-se limitado ao sistema de referência escolhido pelos desenvolvedores do método AICV. A normalização é aplicada usando fatores de normalização (FN). A Tabela 2.2 apresenta alguns fatores de normalização para diversos tipos de impactos ambientais intermediários com base em parâmetros globais e europeus.

Tabela 2.2 – Fatores anuais de normalização para alguns tipos de impactos ambientais intermediários.

Categoria de impacto ambiental intermediário	Fator de normalização	
	Global	Europeu
Efeito Estufa (kg CO_2 equivalente/ano)	$3,36 \times 10^{13}$	$4,49 \times 10^{12}$
Degradação da camada de ozônio (kg CFC-11 equivalente/ano)	$2,29 \times 10^8$	$1,02 \times 10^7$
Combustíveis fósseis (kg de óleo equivalente/ano)	$7,84 \times 10^{12}$	$7,23 \times 10^{11}$
Acidificação (kg SO_2 equivalente/ano)	$2,56 \times 10^{11}$	$1,79 \times 10^{10}$
Toxicidade terrestre (kg 1,4-DB equivalente/ano)	$4,96 \times 10^{10}$	$6,50 \times 10^9$
Toxicidade aquática (kg 1,4-DB equivalente/ano)	$2,77 \times 10^{10}$	$5,43 \times 10^9$
Toxicidade marinha (kg 1,4-DB equivalente/ano)	$4,11 \times 10^{10}$	$1,18 \times 10^{12}$
Eutrofização (kg P equivalente/ano)	$8,55 \times 10^{10}$	$6,93 \times 10^9$
Material particulado (kg PM equivalente/ano)	$3,45 \times 10^{11}$	$2,64 \times 10^{10}$

Fonte: Adaptado de (HUIJBREGTS *et al.*, 2017; HASAN *et al.*, 2019).

De acordo com Hauschild *et al.*, (2018), quanto a ponderação, pode ser usada para determinar quais impactos são mais importantes e a intensidade de sua importância. Esta etapa só pode ser aplicada após a etapa de normalização e permite a priorização de categorias de impacto aplicando pesos diferentes ou iguais a cada indicador de categoria. É importante ressaltar que na maior parte dos casos, não há nenhuma informação científica ou base objetiva para esta etapa. Em outras palavras, não importa qual método de ponderação ou esquema é aplicado, a subjetividade de uma pessoa ou um grupo de indivíduos estará sempre presente. A ponderação pode ser útil para: agregar pontuações de impacto em vários ou um único indicador (observe que de acordo com a ISO 14040/14044, não há base científica para reduzir os resultados de uma ACV para um único resultado ou pontuação devido à ética subjacente das escolhas de valor); Comparar as categorias de impacto; Comunicar resultados aplicando uma priorização subjacente de valores éticos.

Evidenciando a interdependência e influência mútua entre as etapas da ACV, o esquema de ponderação adotado precisa estar de acordo com a definição de objetivo e escopo. Isso implica no fato de que os tomadores de decisão, incluindo suas preferências e as decisões pretendidas a serem apoiadas pelo estudo precisam ser considerados, tornando os valores compartilhados cruciais para a aceitação dos resultados da ACV. Isso pode representar problemas importantes devido à variedade de valores possíveis entre as

partes interessadas, incluindo: acionistas; Estado; clientes; funcionários; autarquias; ONG; sociedade civil; etc.

2.3.4.3 Métodos de AICV

Como mencionado anteriormente, a fase de AICV consiste na transformação dos fluxos de saída dos processos do Ciclo de Vida (CV) da Superestrutura, por meio da identificação de seus efeitos ambientais, a fim de que esses se enquadrem nas categorias de impactos ambientais intermediários. A AICV está obrigatoriamente sujeita a: (1) seleção de categorias de impacto; e (2) tradução dos quantitativos dos fluxos de saída do CV para as categorias de impacto selecionadas. Outras etapas que podem ser necessárias, a depender dos objetivos do trabalho, são: (3) a normalização; (4) o agrupamento; (5) a ponderação (LI *et al.*, 2019).

Os métodos de AICV podem contemplar uma única categoria de impacto ambiental intermediário ou abranger uma multiplicidade de categorias. O segundo tipo, pode ser subdividido em duas quais sejam: (a) método orientado para o problema ou método de impactos ambientais intermediários, que envolve especificamente os impactos ambientais associados às mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, criação fotoquímica de ozônio e assim por diante, que cita-se como exemplares o EDIP 2003 e o IMPACT 2002+; (b) método orientado ao dano ou método de impactos ambientais finais, que transforma os fluxos ambientais em aspectos mais abrangentes como danos gerados à saúde humana e à qualidade do ecossistema ou ao esgotamento dos recursos naturais, que apresenta-se como representantes o ReCiPe, Ecoindicator 99 (JOLLIET *et al.*, 2003; ORTIZ *et al.*, 2009; VAN CANEGHEM *et al.*, 2010).

Na maioria dos casos, além da escolha de pelo menos um dos métodos de análise de impacto ambiental, é necessária a seleção de um *software* que fará a integração entre as bases de dados do inventário, o método de AICV e gerará os relatórios para os diferentes conjuntos de impactos ambientais intermediários ou finais que o estudo se propôs a avaliar.

Segundo Aryan *et al.*, (2023), existe uma diversidade de *softwares* disponíveis para a realização de AICV em qualquer área de pesquisa e alguns de seus exemplares mais utilizados são: SimaPro; GaBi; OpenLCA. Contudo, para aplicações em pavimentação foram desenvolvidas ferramentas específicas como: PaLATE;

CHANGER; Road-RES; CO2NSTRUCT. Outra constatação é que, em seu estudo, verificou que a maior parte dos estudos de AICV de pavimentos rodoviários foi realizada com *softwares* comerciais como SimaPro, em primeiro lugar, e GaBi, em segundo lugar. Tal escolha pode ser explicada em parte pelos fatos de que possuem: uma interface para modelagem produção do sistema; uma biblioteca com métodos de análise de ciclo de vida; bibliotecas de processos; ferramentas para análise dos resultados (HERRMANN E MOLTESEN, 2015). Quanto aos métodos de AICV, tem-se que os mais adotados para análises envolvendo pavimentos rodoviários são o ReCiPe e o CML (ARYAN *et al.*, 2023).

2.3.5 Interpretação da ACV

O principal objetivo da fase de interpretação é resumir, identificar e avaliar os resultados de ICV e AICV e finalmente tirar algumas conclusões para os projetos estudados. Geralmente, esta fase consiste em três elementos: (1) identificação das questões relevantes com base nos resultados de ICV e AICV; (2) avaliação da sensibilidade desses problemas e verificações de consistência e completude; (3) conclusões, recomendações e limitações para o estudo (LI *et al.* 2019).

2.4 Considerações finais

Como uma possível síntese dos levantamentos e apontamentos realizados nesse capítulo ressalta-se: (1) as definições sobre Análise de Ciclo de Vida e informações necessárias para utilizar esse método; (2) indicadores de impacto ambiental comumente utilizados; (3) métodos de análise de impacto inventários de ciclo de vida. Em especial, quanto ao segundo item, apresenta-se na Tabela 2.3 algumas das Categorias de impactos intermediários típicas e emergentes pertinentes ao ciclo de vida dos pavimentos rodoviários. Com relação ao último item citado, expõem-se na **Tabela 2.4** um resumo dos principais métodos de AICV desenvolvidos ao longo dos anos por diversas instituições de diversas partes do globo e que tenham sido previamente utilizados em ACV de infraestruturas rodoviárias.

Tabela 2.3 – Principais Indicadores de impactos ambientais intermediários associados a emissões.

Impacto Ambiental Intermediário	Indicador	CF_m	Unidade	Área de proteção	Referência
Alterações Climáticas	Intensificação de radiação infravermelho	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	kg CO_2 -eq	Ecossistemas terrestres e aquáticos	IPCC, 2014
Degradação da Camada de Ozônio	Redução de Ozônio Estratosférico	Potencial de Degradação de Ozônio (ODP)	kg CFC-11-eq		HAUSCHILD <i>et al.</i> , 2018
Formação Fotoquímica de Ozônio	Aumento de Ozônio Troposférico	Potencial de Formação Fotoquímica (POPC)	kg NO_x -eq		VAN ZELM <i>et al.</i> 2016
Acidificação	Aumento de Cátions no Ambiente	Potencial de Acidificação (TAP)	kg SO_2 -eq		ROY <i>et al.</i> 2014
Eutrofização	Aumento de fósforo em água fresca	Potencial de Eutrofização de água doce (FEP)	kg PO_4 -eq		HELMES <i>et al.</i> 2012
Formação de Material Particulado fino	Aumentar da ingestão de material particulado	Potencial de Formação de Material Particulado (PMFP)	kg $PM_{2,5}$ -eq		VAN ZELM <i>et al.</i> 2016

Fonte: Adaptado de (HUIJBREGTS *et al.*, 2017; SANTOS *et al.* 2019; MARTINEZ- ARGUELLES, *et al.*, 2019; VEGA *et al.* 2020).

Tabela 2.4 – Métodos de AICV usados em AICV de infraestruturas rodoviárias (continua).

Método	Nome	Descrição	Desenvolvedor	Ano	Fonte
TRACI	Tool for Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts	Um programa de ACV baseado no SimaPro específico para uso nos EUA	U.S. Environmental Protection Agency (EPA)	1995	BARE, 2002
Eco-indicator 99	_____	O procedimento metodológico adota uma implementação por meio da combinação da abordagem orientada aos impactos ambientais finais	Consultores da Pré (product ecology consultants)	1997	GOEDKOOP <i>et al.</i> , 1998; GOEDKOOP e SPRIENSMA 2001
ERM	Elementary Road Modulus	Uma ferramenta de avaliação ambiental paramétrica desenvolvida por replicação de ACV e adaptada especificamente para estruturas rodoviárias	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)	1998	HOANG <i>et al.</i> , 2005

Tabela 2.4 – Métodos de AICV usados em AICV de infraestruturas rodoviárias (continuação).

CML	Centrum Milieukunde Leiden	É um método orientado ao problema, isto é, na determinação de impactos ambientais intermediários	Institute of Environmental Sciences at the University of Leiden	2001	GUINÉE <i>et al.</i> , 2002, VAN CANEGHEM <i>et al.</i> , 2010
Athena	Athena Impact Estimator	Um <i>software</i> livre de ACV voltado especificamente para as etapas de construção e manutenção de rodovias no Canadá e nos EUA.	Athena Sustainable Materials Institute	2002	STEK <i>et al.</i> , 2011
PaLATE	Pavement Lifecycle Assessment Tool for Environmental and economic effects	Uma ferramenta de ACV com base em Excel® focada em efeitos econômicos e ambientais	University of California, Berkeley	2003	HORVATH, 2004; MUENCH, 2010
ROAD-RES	Road construction and disposal of residues	Uma ferramenta de ACV focada na comparação da utilização de resíduos oriundos de processos de incineração e de materiais virgens	Technical University of Denmark	2005	BIRGISDOTTIR, 2005; BIRGISDOTTIR <i>et al.</i> , 2007; MUENCH, 2010
ReCiPe	—————	O método de ACV ReCiPe foi desenvolvido para fornece fatores de caracterização de impactos ambientais intermediários e finais	RIVM, Radboud University Nijmegen, Leiden University and Pré Consultants.	2008; atualizado 2016	GOEDKOOP <i>et al.</i> , 2009; GOEDKOOP <i>et al.</i> , 2013; HUIJBREGTS <i>et al.</i> , 2016,
ECORCE	ECO-comparator applied to Road Construction and Maintenance	Uma ferramenta de ACV dedicada a pavimentos rodoviários com base em JAVA® para as etapas de construção e manutenção com foco na redução de materiais, água e energia	French Institute of Science and Technology in Transportation, Planning and Networks	1.0 (2008); 2.0 (2013); M (2014)	JULLIEN <i>et al.</i> , 2015
CHANGER	Calculator for Harmonised Assessment and Normalisation of Greenhouse-gas Emissions for Roads	Uma ferramenta de cálculo para monitoramento, estimações, avaliação e normalização de emissões de GEE oriundos da construção de rodovias	International Road Federation (IRF)	2009	HUANG <i>et al.</i> , 2013

Tabela 2.4 – Métodos de AICV usados em AICV de infraestruturas rodoviárias (continuação).

Método	Nome	Descrição	Desenvolvedor	Ano	Fonte
Roadprint	—————	Um <i>software</i> livre de ACV para avaliação de pavimentos rodoviários novos e reabilitados, que pode ser considerado como uma evolução do PaLATE	University of Washington	2012	MUENCH <i>et al.</i> , 2014
AsPECT	Asphalt Pavement Embodied Carbon Tool	Uma ferramenta de ACV voltada para o cálculo de emissões de dióxido de carbono equivalente oriundas de misturas asfálticas	Transport Research Laboratory	2012	NICUȚĂ, 2011
PE-2	Project Emission Estimator	Programa de monitoramento de emissões de GEE de pavimentos	Michigan Technological University	2012	MUKHERJEE e CASS, 2012; MUKHERJEE <i>et al.</i> , 2013
EcoConcrete	Eco-friendly Concrete	Ferramenta interativa a base de Excel® feita especialmente para quantificar os impactos ambientais do ciclo de vida de produtos de feitos de concreto	Joint Project Group (JPG)	—————	EVANGELISTA e DE BRITO, 2007
IMPACT 2002+	—————	O procedimento metodológico adota uma implementação por meio da combinação da abordagem orientada aos impactos ambientais intermediários e finais	Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), atualmente mantido e aperfeiçoado pelo The IMPACT Modeling Team.	—————	JOLLIET <i>et al.</i> , 2003; HUMBERT <i>et al.</i> , 2012

Fonte: Adaptado de (CHONG e WANG, 2017; HUIJBREGTS *et al.*, 2017, SANTOS *et al.* 2017a; LI *et al.*, 2019; VEGA *et al.*, 2020).

3. CICLO DE VIDA DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

3.1 Considerações iniciais

No caso de infraestruturas rodoviárias, o elemento que demanda maior quantidade de recursos é o pavimento, tanto na sua construção quanto na sua manutenção. Além disso, a condição de conservação dos pavimentos tem grades impactos na etapa de operação das vias, podendo interferir nas questões de segurança, conforto e custos de manutenção dos veículos para os usuários do sistema (BERNUCCI *et al.*, 2022).

3.2 Etapas ACV de pavimentos

A ACV é uma metodologia estruturada para determinar os tipos e quantidades os impactos gerados ao longo do ciclo de vida de uma cadeia de suprimentos, examinando os inputs e outputs, de um produto ou sistema. No caso específico de pavimentos rodoviários, o ciclo de vida pode conter as seguintes etapas, quais sejam: (1) Exploração dos insumos virgens; (2) Transporte de insumos; (3) Usinagem dos materiais; (4) Transporte dos materiais do pavimento; (5) Construção do pavimento; (6) Conservação e Manutenção; (7) Uso; (8) Reciclagem; (9) Demolição; (10) Reconstrução (HARVEY *et al.*, 2014, CHONG *et al.*, 2018, HASAN *et al.*, 2019).

Uma representação da forma com que as fases do ciclo de vida de um pavimento asfáltico rodoviário se relacionam e quais processos costumam ser considerados dentro de cada uma delas está presente na **Figura 3-1**. Por meio dessa, pode-se notar: (a) o encadeamento das etapas com relação a ordem cronológica de ocorrência; (b) a alimentação de diferentes etapas por uma mesma etapa, como é, por exemplo, o caso da etapa de produção de insumos que supre a fase de construção e de manutenção; (c) a participação do transporte em todas as etapas, mesmo que seja com relevâncias diferentes; (d) os estágios de uso /operação e manutenção / reabilitação, embora ocorram no mesmo período, isto é, durante todo o ciclo de vida do pavimento, costumam ser analisadas de forma separada; (e) os tipos de ACV que podem existir, com relação as etapas que são consideradas no estudo. Quanto as anotações que se pode fazer por meio da **Figura 3-1**, as três primeiras (a, b, c) são autoexplicativas, mas a quarta (d) e a quinta (e) carecem de maior aprofundamento.

No que diz respeito a observação (d), a separação em duas etapas é uma tentativa de racionalização para se organizar o fato de que se deseja verificar efeitos de diferentes processos que, em última análise, estão associados aos usuários ou aos gestores da via. Isso faz com que os fluxos materiais e energéticos que alimentam cada uma possuem diferenças significativas e, conseqüentemente, impactos ambientais diferentes. Com relação ao apontamento (e), segundo Li *et al.* (2019), uma ACV, no que diz respeito as etapas do ciclo de vida de um pavimento que serão incluídas na análise, recebe diferentes denominações, quais sejam: (i) *from Cradle to Gate* (do berço ao portão) quando são consideradas as etapas de exploração e produção de insumos, produção de materiais e construção; (ii) *from Cradle to Grave* (do berço ao túmulo) quando abrangem as etapas do tipo anterior, adicionando-se as fases de uso / operação, manutenção / reabilitação e fim de vida, sem considerar a reciclagem total dos elementos que constituíam o pavimento; (iii) *from Cradle to Cradle* (do berço ao berço) quando o estudo abrange todas as etapas citadas e é necessariamente considerado o processo de reciclagem dos elementos que compunham o pavimento que voltam para o início da cadeia. Cabe reforçar que, para qualquer que seja o tipo de ACV adotado, a etapa de transporte está sempre presente conectando as etapas, que ocorrem majoritariamente em localidades geográficas distintas.

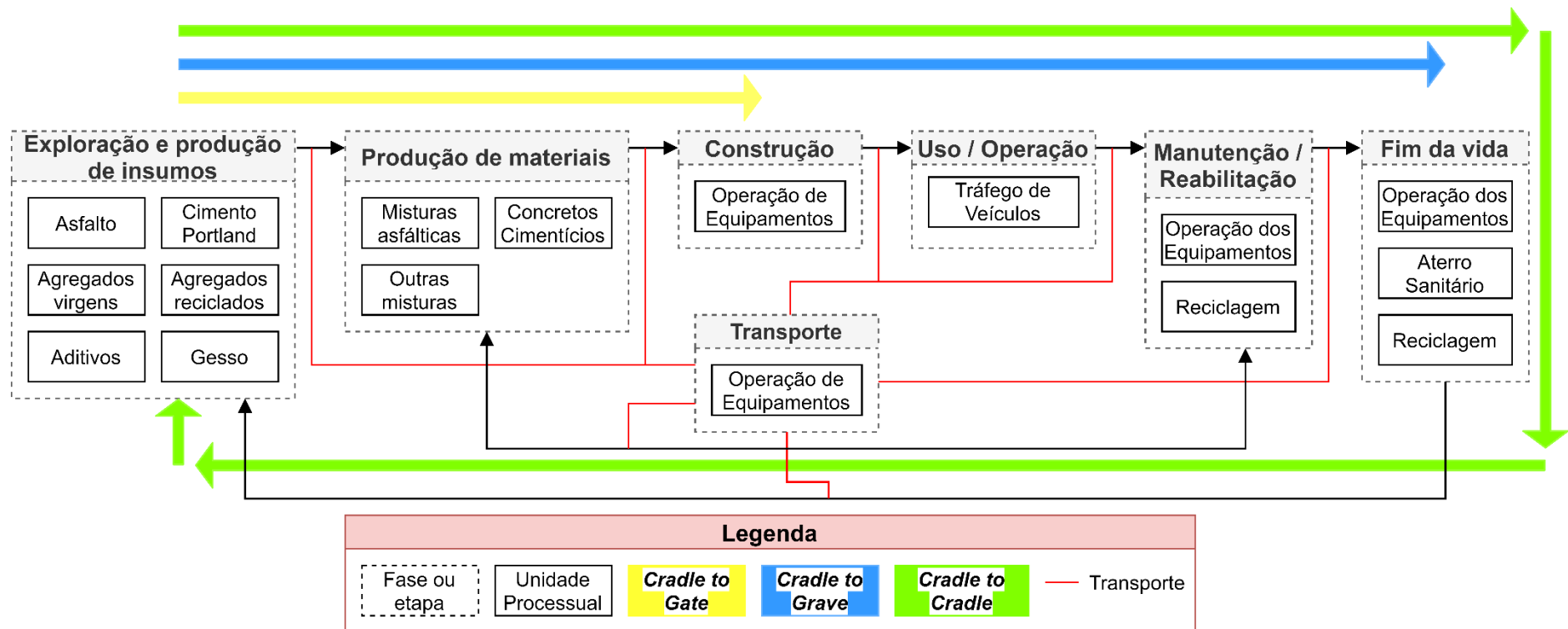


Figura 3-1 – Ilustração das etapas do ciclo de vida de um pavimento flexível rodoviário.
 Fonte: Adaptado de (CHONG *et al.*, 2018; ZHENG *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2019).

Dentro de cada etapa do ciclo de vida existe um conjunto de processos. Nas unidades processuais são inseridos diferentes tipos de energia e de materiais, que são misturados e modificados, e depois, como saída, tem-se um produto de interesse e indesejáveis emissões de substâncias que podem afetar o solo, a água e o ar (HAUSCHILD *et al.*, 2018; CONG *et al.*, 2020). A Figura 3-2 ilustra o funcionamento descrito acima.

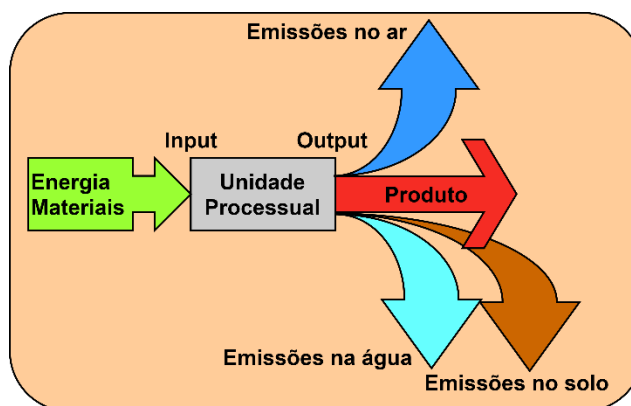


Figura 3-2 – Ilustração de unidade processual genérica quanto suas entradas e saídas do ponto de vista ambiental.

Fonte: Adaptado de (HAUSCHILD *et al.*, 2018; CONG *et al.*, 2020).

3.3 Exploração e produção de insumos virgens

Essa etapa compreende os processos de extração, beneficiamento e produção dos materiais que serão usados nas etapas de construção, manutenção e reabilitação do pavimento asfáltico. Em sua maioria, consistem nos agregados, em toda sua variedade granulométrica, ligantes asfálticos e suas misturas. Não é costume considerar nessa ou em qualquer outra fase, os impactos associados a fabricação de equipamentos ou construção das plantas de exploração ou produção de qualquer um dos insumos. A fim de facilitar a consideração do transporte antes de um insumo natural ou pré processado (agregado, asfalto) se tornar um material que efetivamente comporá alguma camada do pavimento nas etapas de construção, manutenção e reabilitação, é comum que todos os impactos ambientais oriundos do transporte desses insumos nas etapas de extração, beneficiamento e produção sejam considerados como impactos dentro dessas fases do CV (SANTOS *et al.*, 2015a; HARVEY *et al.*, 2014)

3.3.1 Asfalto

Mistura de hidrocarbonetos formada naturalmente que é extraída do petróleo por processo de destilação fracionada, cujo principal componente é betume. As características que fazem com que esse material seja utilizado como material na pavimentação: proporcionar forte união flexível e controlável dos agregados; ter ação impermeabilizante durável; resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, ou seja baixa reatividade; ser reciclável (BERNUCCI *et al.*, 2022).

No caso do asfalto, todos os processos que o disponibilizam como insumo para pavimentação estão associados a extração, transporte, refino e beneficiamento do petróleo. Assim como os demais insumos e materiais, esse deve ter seus impactos ambientais estimados. Etapas do ciclo de vida do asfalto para compor as camadas asfálticas: (1) origem do petróleo (poço em terra ou submerso); (2) processo de extração do petróleo; (3) composição do petróleo; (4) transporte para o local de refino (por meio de dutos ou cargueiros); (5) técnica de refino do petróleo; (6) armazenamento do asfalto; (7) processo de beneficiamento do asfalto; (8) transporte para a usina de mistura asfáltica (BLAAUW *et al.*, 2020; EUROBITUME, 2020). A Figura 3-3 apresenta um esquema simplificado do encadeamento de processos necessários para obtenção de asfalto virgem para a elaboração de misturas asfálticas utilizadas na pavimentação.

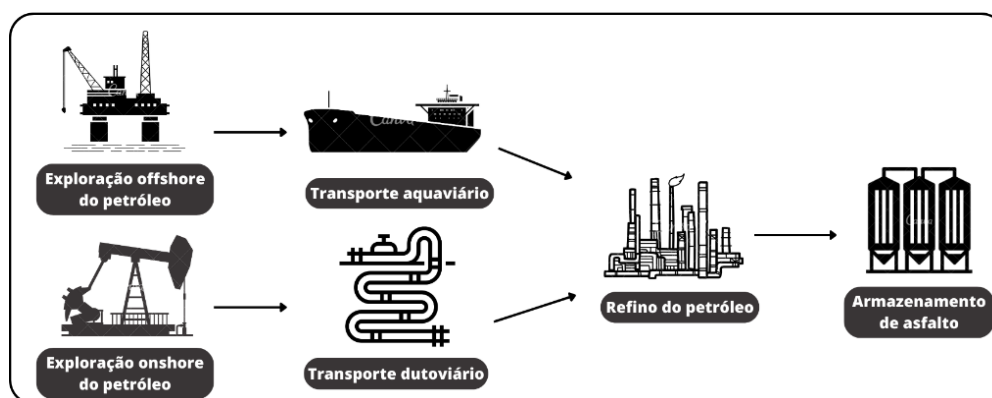


Figura 3-3 – Esquema de obtenção do asfalto para pavimentação.

Fonte: Adaptado de (EUROBITUME, 2020).

BLAAUW *et al.* (2020) apresenta uma proposta de procedimento metodológico para a elaboração de uma ACV com uma abordagem *cradle-to-gate* do asfalto utilizado para pavimentação de rodovias na África do Sul. Notadamente foram considerado: (1) Extração de petróleo bruto, que inclui os requisitos para extração de petróleo bruto de

reservas de petróleo na África e no Oriente Médio e preparação para transporte; (2) Transporte de petróleo bruto, que inclui os processos necessários para o transporte de petróleo bruto por navio (costeiro) e oleoduto (terrestre) para as refinarias sul-africanas relevantes; (3) Refinamento e armazenamento de betume, que inclui os processos necessários para processar, refinar e armazenar betume para pavimentação na África do Sul. Alguns dos impactos ambientais intermediários levantados e comparações com valores médios europeus feitas por Blaauw *et al.* (2020) são expostos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – ACV de asfalto usado em pavimentação rodoviária e seus impactos ambientais.

Cenário	Impacto Ambiental	Etapas da ACV do asfalto			Valor Total	Unidade	Referência
		Extração	Transporte	Refino e Armazenamento			
Costeiro	Mudanças Climáticas	157,38	11,42	53,09	221,89	kg CO _{2-eq} /t	Blaauw et al. (2020)
Terrestre			22,89		233,36		Blaauw et al. (2020)
Genérico			35,0		207,5		EUROBETUME (2020)
Costeiro	Consumo Energético	1.450,28	141,15	610	2.201,40	MJ/t	Blaauw et al. (2020)
Terrestre			179,75		2.240,00		Blaauw et al. (2020)
Genérico			572,5		45.772		EUROBETUME (2020)
Costeiro	Pegada de Enxofre	0,40	0,13	0,60	1,13	kg SO ₂ /t	Blaauw et al. (2020)
Terrestre			0,23		1,23		Blaauw et al. (2020)
Genérico			-		-		EUROBETUME (2020)
Costeiro	Pegada de Nitrogênio	0,25	0,51	1,75	2,51	kg NO _x /t	Blaauw et al. (2020)
Terrestre			0,56		2,56		Blaauw et al. (2020)
Genérico			-		-		EUROBETUME (2020)

Fonte: adaptado de (BLAAUW *et al.*, 2020; EUROBITUME, 2020).

Os ligantes asfálticos são um material semissólido e viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas, sendo constituído de 90% a 95% de hidrocarbonetos e restante de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio). Para a maioria das aplicações rodoviárias os asfaltos convencionais apresentam bom comportamento, no entanto, algumas modificações nos asfaltos podem melhorar suas propriedades e consequentemente o desempenho mecânico dos revestimentos asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2022).

A principal forma de modificação de ligantes asfálticos consiste na incorporação de polímeros por mistura mecânica ou reação química. Assim como a diversidade de polímeros divididos em dois grupos, elastômeros e plastômeros, seus efeitos também o

são e dependem de questões como compatibilidade entre os materiais a serem processados, estabilidade e aplicabilidade prática. (LU e ISACSSON, 2000). A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos principais polímeros utilizados no melhoramento de ligantes asfálticos.

Tabela 3.2 – Exemplos de polímeros utilizados na modificação de ligantes asfálticos.

Categorias	Exemplos	Vantagens	Desvantagens
Plastômeros	<ul style="list-style-type: none"> • Polietileno (PE) • Polipropileno (PP) 	<ul style="list-style-type: none"> • Boas propriedades em temperaturas elevadas • Custo relativamente baixo 	<ul style="list-style-type: none"> • Melhoria limitada na elasticidade • Problemas de separação de fase
Plastômeros	<ul style="list-style-type: none"> • Etileno-vinil acetato (EVA) • Etileno-butil acrilato (EBA) 	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidade à estocagem relativamente boa • Elevada resistência à deformação permanente 	<ul style="list-style-type: none"> • Melhoria limitada na elasticidade • Limitada melhoria nas propriedades em temperaturas baixas
Elastômeros termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Estireno-butadieno-estireno (SBS) • Estireno-isopreno-estireno (SIS) 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada rigidez • Sensibilidade térmica reduzida • Retorno elástico elevado 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de compatibilidade em alguns asfaltos • Baixa resistência a temperaturas elevadas, à oxidação e aos raios ultravioletas • Custo relativamente alto
Elastômeros termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Estireno-etileno / butileno-estireno (SEBS) 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência a temperaturas elevadas, à oxidação e aos raios ultravioletas 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de estabilidade na estocagem • Elasticidade relativamente reduzida • Custo elevado
Elastômeros termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Borracha estireno-butadieno (SBR) 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevação da resistência a fissuração a baixas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa resistência a temperaturas elevadas, à oxidação e aos raios ultravioletas

Fonte: adaptado de (ZHU *et al.*, 2014; MENG *et al.*, 2023).

3.3.2 Agregados minerais

Nessa etapa devem ser levantados os impactos obtenção dos agregados minerais virgens que serão utilizados na elaboração dos materiais das camadas do pavimento. Quanto aos agregados graúdos, estes podem ser utilizados tanto na produção de misturas asfálticas geralmente aplicadas nas camadas de revestimento quanto em melhoramentos de granulométricos de bases (BERNUCCI *et al.*, 2022). Os processos habituais são: (1) desmonte de rocha; (2) carregamento e transporte do material que será britado; (3)

processo de britagem; (4) transporte do material britado para a planta de usina de asfalto (MARTINEZ-ARGUELLES, ACOSTA *et al.*, 2019; VEGA ARAUJO *et al.*, 2020). A Figura 3-4 apresenta um esquema simplificado do encadeamento de processos necessários para obtenção de agregados minerais graúdos virgens para a construção de pavimentos.



Figura 3-4 – Esquema de obtenção de agregados graúdos virgens para pavimentação.
 Fonte: adaptado de (VEGA ARAUJO *et al.*, 2020).

Quanto aos agregados miúdos, podem ser obtidos tanto pela adequação do processo de britagem, quanto pelos processos de dragagem. Existem diferentes processos de dragagem a serem adotados de acordo com as condições de projeto e do local de implantação. Na dragagem mecânica, o serviço pode ser realizado, por exemplo, com retroescavadeiras ou escavadeiras de arrasto com ou sem adaptações, extraem o material do depósito. No caso da dragagem por sucção e recalque, equipamentos especiais atuam desagregando o material a ser extraído. Posteriormente, esse material desagregado passa pelo processo de sucção e é transportado por dutos até local separação, secagem e armazenamento (GOES FILHO, 2004). A Figura 3-5 apresenta o esquema simplificado do encadeamento de processos necessários para obtenção de agregados minerais miúdos virgens para a construção de pavimentos.

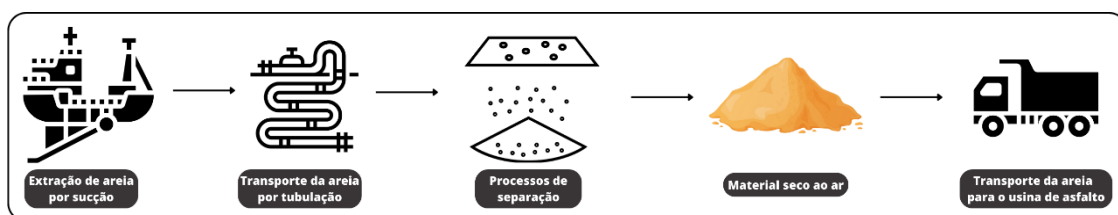


Figura 3-5 – Esquema de obtenção de agregados miúdos virgens para pavimentação.

Fonte: adaptado de (GOES FILHO, 2004).

3.4 Usinagem e fabricação da mistura asfáltica

Essa etapa do ciclo de vida de um pavimento rodoviário tem o objetivo de reunir os diferentes insumos oriundos da fase de exploração e processá-los para comporem as camadas do pavimento e possibilitarem o melhor comportamento do pavimento perante as solicitações do tráfego e as ações do ambiente. Quanto as misturas asfálticas, majoritariamente tem-se: (1) transporte de agregados virgens das baias para os silos alimentadores (2) secagem e aquecimento dos agregados; (3) aquecimento do ligante asfáltico; (4) mistura dos agregados com o ligante. No que diz respeito aos materiais que compõem as camadas de base, sub-base e reforço de subleito, cita-se: (4) estabilização granulométrica; (6) estabilização química (SANTOS *et al.*, 2018; ZHENG *et al.*, 2019; VEGA ARAUJO *et al.*, 2020).

3.5 Transporte

A fase de transporte de materiais perpassa todas as demais etapas do CV de um pavimento rodoviário. Por exemplo, no caso dos materiais que serão utilizados em um novo pavimento ou para a manutenção ou reabilitação de um pavimento existente precisa ser transportado de uma usina de mistura ou pedreira para o local de trabalho. Outro caso seria os materiais residuais oriundos de manutenção ou reabilitação que necessitam ser transportados do local de trabalho para um instalações de reciclagem ou eliminação. Os impactos ambientais frutos do transporte de materiais podem ser influenciados principalmente por: (1) tecnologia do motor do equipamento de transporte; (2) capacidade de carga útil do equipamento de transporte; (3) distância de transporte; (4) velocidade de transporte; (5) massa de materiais sendo transportados (SANTOS *et al.*, 2015a).

3.6 Construção do pavimento

Na fase de construção e partes das fases de manutenção e reabilitação, os impactos ambientais a serem considerados costumam ser procedentes da combustão: (1) dos combustíveis utilizados pelos equipamentos utilizados nos diversos processos e serviços realizados na via; (2) dos combustíveis consumidos pelos veículos que eventualmente ficam retidos ou têm sua velocidade média de cruzeiro alterada pelas restrições impostas pelos bloqueios de tráfego e desvios necessários para a implementação da manutenção e reabilitação ou duplicação (SANTOS *et al.*, 2015a; HARVEY *et al.*, 2014).

3.7 Unidade funcional

A unidade funcional define o sistema que será estudado e atua como referência de cálculo dos dados de entrada e saída em qualquer uma das fases do ciclo de vida do produto ou serviço. Essa visa garantir a equivalência entre as alternativas que serão comparadas e reduzir interferências nas análises. Para isso, as unidades funcionais devem ser caracterizadas segundo alguns parâmetros descritos a seguir.

O primeiro parâmetro de descrição de uma unidade funcional seria a aplicação do projeto que determinará as características e os componentes do sistema com base no objetivo a que se destina. O segundo, o local de desenvolvimento do estudo influenciará na coleta e aplicabilidade dos dados, a importância dos diferentes indicadores da categoria de impacto e a interpretação dos resultados. O terceiro seria representado pelo conjunto de limites físicos da unidade funcional que definem as porções da estrutura do pavimento a considerar como parte do sistema de pavimento no estudo. As dimensões físicas permitem a determinação de volumes, massas, áreas de superfície e outras quantidades necessárias para efetuar a ACV (HARVEY *et al.* 2016).

Ainda acerca dos critérios de caracterização das unidades funcionais cita-se, a avaliação de desempenho de pavimentos que envolve a vida útil de projeto, vida útil funcional e outros critérios funcionais, como a rugosidade e demais parâmetros de desgaste e deterioração. O padrão de desempenho deve ser apropriado para a aplicação, localização e limites físicos da unidade funcional. A métrica da unidade de desempenho pode desempenhar um papel crucial na interpretação do estudo, especialmente em ACV comparativas em que são comparados dois produtos diferentes que oferecem o mesmo serviço. Por fim, elenca-se as recomendações para a seleção do período de análise que visam captar os impactos da decisão atual e a sua influência nos tratamentos de manutenção/preservação subsequentes, pelo menos até a duração do próximo grande tratamento de reabilitação ou reconstrução (HARVEY *et al.* 2016).

A definição da unidade funcional é fundamental para o desenvolvimento e interpretação da ACV, contudo ainda não existe um consenso de qual seria a unidade funcional mais adequada a ser adotada para a elaboração de estudo abordado pavimentos. Algumas unidades funcionais já adotadas foram: 1,0 km de faixa construída (KUCUKVAR e TATARI 2012; BALAGUERA *et al.* 2018); 1,0 km de faixa construída

com largura de 13 m e 0,08 m de espessura (VIDAL *et al.* 2013); 1,0 km de faixa construída com largura de 9 m (ARAÚJO *et al.* 2014); 1,0 km de faixa construída com largura de 3,5 m (VEGA ARAUJO *et al.*, 2020); m² de pavimento construído (FERREIRA *et al.* 2016); m² de revestimento asfáltico (HUANG *et al.* 2009); 1,6 km de faixa construída (YANG *et al.* 2015).

3.8 Considerações finais

Das questões abordadas sobre a análise de ciclo de vida de pavimentos rodoviários nessa etapa do trabalho destaca-se: (1) as etapas usualmente adotadas na segmentação do ciclo de vida de pavimentos rodoviários; (2) as considerações pertinentes a cada uma dessas fases; (3) a importância da definição das unidades funcionais para a elaboração das análises de ciclo de vida, embora não haja consenso dentro da academia quanto a unidade funcional mais adequada a ser adotada. Nesse sentido, quanto a primeira observação, expõem-se na Tabela 3.3 algumas pesquisas que se propuseram a realizar análises de ciclo de vida evidenciando-se as etapas examinadas e os indicadores de impacto ambiental discutidos. Para ilustrar os assuntos percorridos até então, exhibe-se na Tabela 3.4 estudos que promoveram análises de ciclo de vida de pavimentos rodoviários, mas dessa vez, explicitando-se: (a) os objetivos e escopos; (b) as fases do ciclo de vida; (c) as fontes de dados utilizadas; (d) os métodos de AICV adotados; (e) e os impactos ambientais avaliados.

Tabela 3.3 – Coletânea de trabalhos que empregaram ACV em estudos sobre pavimentos rodoviários, expondo as etapas consideradas e os indicadores de impacto ambiental analisados (contínua).

Estudos	Etapas do Ciclo de Vida					Indicadores de Impacto Ambiental										
	Extração/Produção	Trasporte de materiais	Construção	Uso	Manutenção	Reciclagem	Gases de efeito estufa (CO ₂ eq)	Consumo energético (MJ)	Dióxido de Carbono (CO ₂)	Monóxido de Carbono (CO)	Metano (CH ₄)	Óxidos de Enxofre (SO _x)	Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	Material Particulado (PM10)	Óxido Nitroso (N ₂ O)	Compostos orgânicos voláteis (VOC)
Huang <i>et al.</i> (2009)	X	X	X				X	X				X	X			
Yu e Lu (2012)	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
Yu <i>et al.</i> (2013)		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Chou <i>et al.</i> (2013)	X				X			X	X				X	X		
Yu e Lu. (2014)		X	X	X		X		X								

Tabela 3.3 – Coletânea de trabalhos que empregaram ACV em estudos sobre pavimentos rodoviários, expondo as etapas consideradas e os indicadores de impacto ambiental analisados (continuação).

Estudos	Etapas do Ciclo de Vida					Indicadores de Impacto Ambiental										
	Extração/Produção	Trasporte de materiais	Construção	Uso	Manutenção	Reciclagem	Gases de efeito estufa (CO ₂ eq)	Consumo energético (MJ)	Dióxido de Carbono (CO ₂)	Monóxido de Carbono (CO)	Metano (CH ₄)	Óxidos de Enxofre (SO _x)	Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	Material Particulado (PM10)	Óxido Nitroso (N ₂ O)	Compostos orgânicos voláteis (VOC)
Araújo <i>et al.</i> (2014)	X	X	X	X	X	X	X									
Santos <i>et al.</i> (2015a)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
Santos <i>et al.</i> (2015b)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Liu <i>et al.</i> (2015)	X	X	X	X	X	X	X									
Mauro <i>et al.</i> (2016)	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X		
Chen <i>et al.</i> (2016)	X		X	X		X			X	X	X	X	X	X		
Butt <i>et al.</i> (2016)	X	X	X				X	X	X		X				X	
Chong e Wang (2017)	X	X	X	X	X	X	X	X								
Santos <i>et al.</i> (2017b)	X	X	X	X	X	X	X									
Moretti <i>et al.</i> (2017)	X	X					X									
Liu <i>et al.</i> (2018)	X		X				X									
Hong e Prozzi (2018)	X	X	X	X	X	X		X								
Gulotta <i>et al.</i> (2019)	X	X	X		X	X		X								
Wang <i>et al.</i> (2020)	X	X	X	X	X			X	X		X					
Cong <i>et al.</i> (2020)	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X			X	
Huang <i>et al.</i> (2021)	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X
Total	19	18	19	14	15	14	10	13	12	9	9	9	10	5	5	1

Tabela 3.4 – Exemplos combinações de bases de dados, métodos de AICV, *softwares* e impactos estimados na realização de ACV de pavimentos rodoviários (contínua).

Objetivo	Etapas do CV	Fonte de dados	Método de AICV	Software	Impactos analisados	Referências
Comparação dos impactos ambientais associados a produção CBUQ com agregados virgens e reciclados	Cradle-to-site: transporte; extração e usinagem; construção	Dados da região; Ecoinvent v.3 e USLCI (United States life cycle inventory)	TRACI	SimaPro	ODP, GWP, POPC, TAP, Eutrofização (EP), Consumo de combustível fóssil, Danos a saúde humana, Ecotoxicidade	VEGA ARAUJO <i>et al.</i> , 2020
Comparação dos impactos econômicos e ambientais do uso de diferentes materiais para as camadas de um pavimento	Cradle-to-site: transporte; extração e usinagem; construção	Dados da região, Ecoinvent v.3, revisão literária	CML Baseline	SimaPro	GWP, Consumo de combustível fóssil, Custo	NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2020
Comparação dos impactos ambientais associados a produção CBUQ com agregados virgens e reciclados	Cradle-to-gate: extração; britagem (RCA); transporte para armazenamento	Dados da região e Ecoinvent v.3	IMPACT 2002+	SimaPro	GWP, TAP, ODP, Eutrofização (EP), Consumo de combustível fóssil, Danos a saúde humana, Ecotoxicidade	MARTINEZ-ARGUELLES, ACOSTA <i>et al.</i> , 2019

Tabela 3.4 – Exemplos combinações de bases de dados, métodos de AICV, *softwares* e impactos estimados na realização de ACV de pavimentos rodoviários (continuação).

Objetivo	Etapas do CV	Fonte de dados	Método de AICV	Software	Impactos analisados	Referências
Comparação dos impactos econômicos, sociais e ambientais associados a utilização do RCA na base pavimentos (PCC) com os convencionais	Cradle-to-grave: usinagem; construção; uso; manutenção; fim da vida	Dados da região; Oklahoma DOT AADT Traffic Counts	TRACI	EIO-LCA model developed by CMU	GWP, TAP, ODP, POPC, EP, Danos à saúde humana, Ecotoxicidade	SHI <i>et al.</i> , 2019
Comparação dos impactos ambientais associados a produção CBUQ com agregados virgens e reciclados	Cradle-to-site: transporte do local de demolição (RCA); extração e usinagem; bota-fora (RCA); transporte da usina de concreto; transporte para o local de construção	Dados da região; Ecoinvent v.3 e USLCI (United States life cycle inventory)	IMPACT 2002+	SimaPro	GWP, Danos a saúde humana, Ecotoxicidade, Consumo de combustível fóssil	ROSADO <i>et al.</i> , 2017
Comparação dos impactos ambientais associados a produção CBUQ com agregados virgens e reciclados	Cradle-to-gate: extração e usinagem; transporte para a usina; produção na usina	Revisão literária, Ecoinvent v.3 e ELCD (European life cycle database)	CML baseline method and Cumulative Energy Demand	SimaPro	ADP, GWP, ODP, POPC, TAP, EP	BRAGA <i>et al.</i> , 2017

Tabela 3.4 – Exemplos combinações de bases de dados, métodos de AICV, *softwares* e impactos estimados na realização de ACV de pavimentos rodoviários (continuação).

Objetivo	Etapas do CV	Fonte de dados	Método de AICV	Software	Impactos analisados	Referências
Comparar as diferenças entre os impactos ambientais gerados por agregados reciclados e agregados virgens	Cradle-to-site: extração de materiais; britagem; transporte em todas as etapas até a construção.	CLP (Chinese Light and Power), CLCD (Chinese life cycle database) e ELCD (European life cycle database)	IMPACT 2002+	SimaPro	GWP, TAP, ODP, POPC, EP, Consumo de combustível fóssil, Danos a saúde humana, Ecotoxicidade	HOSSAIN <i>et al.</i> , 2016
Comparar os impactos ambientais associados agregados para misturas asfálticas: (i) virgens; (ii) reciclados em uma usina fixa; (iii) reciclados em uma usina móvel.	Cradle-to-site: transporte do local de demolição (RCA); extração e usinagem; botafora (RCA); transporte da usina de concreto; transporte para o local de construção	Dados da região	Eco-indicator 99, CML Baseline and Cumulative Energy Demand	SimaPro	GWP, TAP, ODP, EP, Danos a saúde humana, Ecotoxicidade, Consumo de combustível fóssil	ESTANQUEIRO <i>et al.</i> , 2016

Tabela 3.4 – Exemplos combinações de bases de dados, métodos de AICV, *softwares* e impactos estimados na realização de ACV de pavimentos rodoviários (continuação).

Objetivo	Etapas do CV	Fonte de dados	Método de AICV	Software	Impactos analisados	Referências
Comparar as diferenças entre os impactos ambientais gerados por agregados reciclados e agregados virgens	Cradle-to-site: extração de materiais; britagem; transporte em todas as etapas até a construção.	CLP (Chinese Light and Power), CLCD (Chinese life cycle database) e ELCD (European life cycle database)	IMPACT 2002+	SimaPro	GWP, TAP, ODP, POPC, EP, Consumo de combustível fóssil, Danos a saúde humana, Ecotoxicidade	HOSSAIN <i>et al.</i> , 2016
Comparar os impactos ambientais associados agregados para misturas asfálticas: (i) virgens; (ii) reciclados em uma usina fixa; (iii) reciclados em uma usina móvel.	Cradle-to-site: transporte do local de demolição (RCA); extração e usinagem; botafora (RCA); transporte da usina de concreto; transporte para o local de construção	Dados da região	Eco-indicator 99, CML Baseline and Cumulative Energy Demand	SimaPro	GWP, TAP, ODP, EP, Danos a saúde humana, Ecotoxicidade, Consumo de combustível fóssil	ESTANQUEIRO <i>et al.</i> , 2016

Fonte: Adaptado de (VEGA *et al.*, 2020).

4. PROPOSTA DE PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

4.1 Considerações iniciais

De acordo com o objetivo de investigar o efeito das misturas asfálticas na Análise de Ciclo de Vida de pavimentos, com ênfase na compreensão dos impactos ambientais associados as mudanças climáticas. Na Figura 4-1, está exposto o fluxograma do procedimento metodológico proposto. Nela pode-se observar cinco etapas, quais sejam:

- (1) Determinação do objetivo e escopo da Análise de Ciclo de Vida:
 - Estabelecimento dos objetivos da ACV;
 - Delimitação das etapas do ciclo de vida a serem consideradas para as alternativas;
 - Determinação do período de análise;
 - Determinação da unidade funcional;
- (2) Determinação dos pavimentos:
 - Caracterização das alternativas de pavimentos a serem avaliados;
- (3) Dimensionamento mecanístico-empírico do pavimento:
 - Caracterização mecânica dos materiais do pavimento;
 - Determinação do método de dimensionamento dos pavimentos;
 - Realização do dimensionamento propriamente dito para as diferentes alternativas em análise;
- (4) Elaboração do Inventário de Ciclo de Vida:
 - Determinação dos serviços e processos necessários para a obtenção dos insumos, fabricação dos materiais, bem como a construção das camadas;
- (5) Elaboração da Análise de Impacto de Ciclo de Vida:
 - Seleção do Método de Análise do Ciclo de Vida;
 - Cálculo dos impactos ambientais associados a cada pavimento analisado;
- (6) Determinação dos indicadores de desempenho ambiental:
 - Determinação dos impactos ambientais para a unidade funcional estabelecida relacionando a variável estudada.

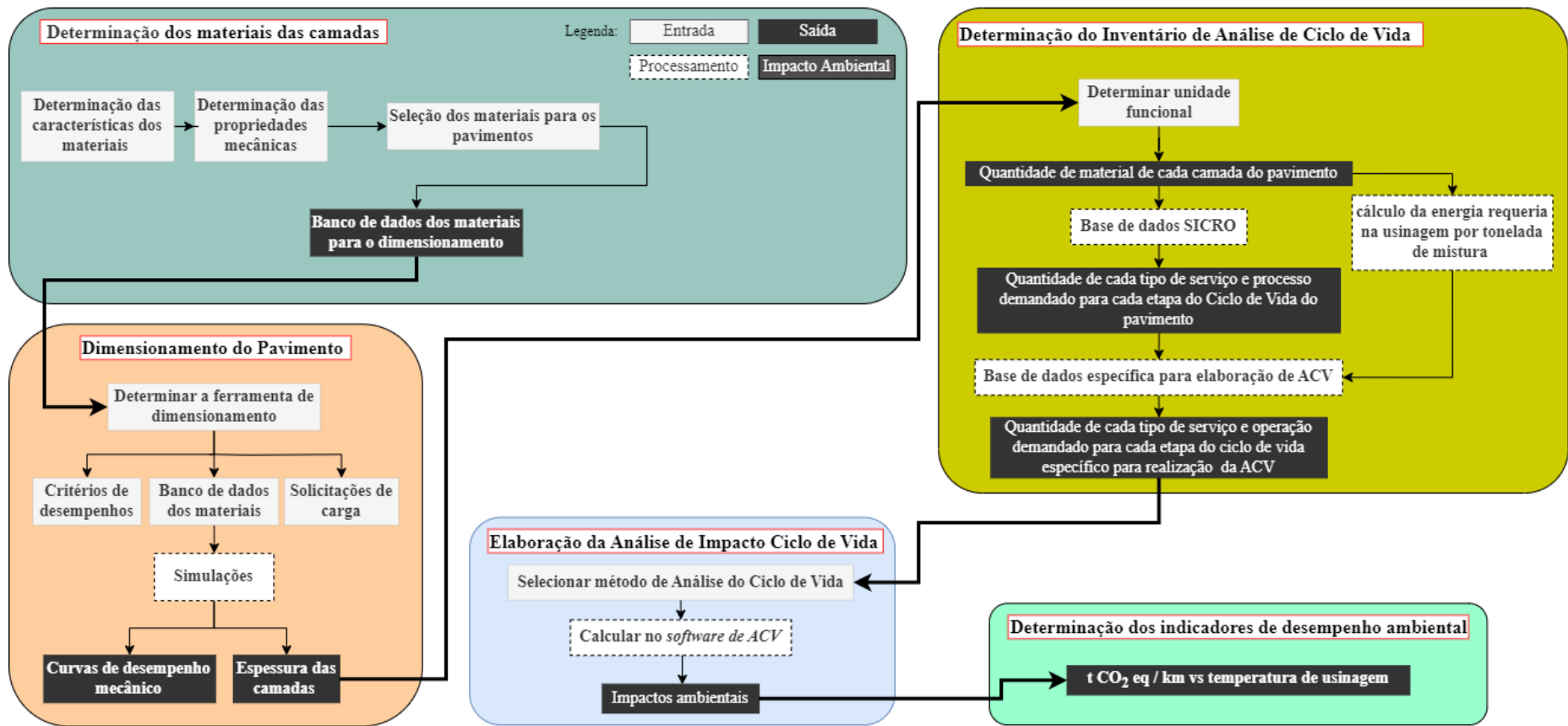


Figura 4-1 – Fluxograma descritivo do procedimento metodológico proposto para a realização de uma Análise de Ciclo de Vida de pavimentos asfálticos.

4.2 Determinação da análise de ciclo de vida

Nessa fase da ACV são definidos os objetivos a serem alcançados por meio da aplicação da análise de ciclo de vida. Por exemplo, a determinação de uma hierarquia entre projetos de pavimentação segundo indicadores de impactos ambientais. Nessa etapa também são determinadas as fases de ciclo de vida dos pavimentos serem consideradas, bem como os períodos de avaliação. Por fim deve-se estabelecer os impactos ambientais a serem determinados e a unidade funcional mais adequada para a sua exposição e análise dos resultados.

4.3 Determinação dos pavimentos

Nessa etapa deve-se determinar as soluções que serão adotadas para as demandas de tráfego. Em outras palavras, a classificação das vias adotadas para atender as demandas de tráfego e os materiais que serão adotados na construção das alternativas de pavimentos propriamente ditos. Essas medidas possibilitarão em última instância a determinação da unidade funcional dos estudos a serem realizados.

4.3.1 Classificação da Via

Um processo de classificação variaria visa a padronização, no intuito de garantir que situações similares sejam tratadas de forma homogêneas. Nesse intuito, adota-se nesse trabalho a classificação proposta pelo Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais. Os principais critérios, são: largura de plataforma de rolamento; largura de acostamento; volume médio diário anual (DNER, 1999).

4.3.2 Determinação dos Materiais

Nesse passo, é necessário selecionar os materiais que serão utilização na construção das camadas dos pavimentos as serem analisados. Esse passo influenciará o comportamento mecânico do pavimento, os tipos e as quantidades de serviços necessários em todas as etapas do ciclo de vida do pavimento, bem como os impactos ambientais de cada pavimento analisado.

4.4 Dimensionamento dos pavimentos

O objetivo dessa seção é o dimensionamento dos pavimentos propriamente ditos, do mesmo modo que a determinação das curvas de desempenho para os critérios que determinam os finais de suas vidas úteis.

4.4.1 Caracterização mecânica

É importante ressaltar que nesse trabalho assume-se que, a partir do ano 2021, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2021), iniciou a adoção de procedimentos para transição do método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa). Os procedimentos podem ser verificados a partir da nova instrução de serviço (IS) específica para a elaboração e implantação de projetos com base no novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis – MeDiNa, a IS-247 discorre sobre a elaboração de estudos geológico-pedológicos, estudos geotécnicos, estudo de misturas asfálticas, apresentação de relatório e resultados e demais observações pertinentes. Contudo, qualquer outro método de dimensionamento que seja capaz de fornecer os mesmos tipos de saídas que o MeDiNa gera seria de fácil aplicação sem necessidade de adaptações profundas do método de ACV proposto.

Segundo (DNIT, 2021), para utilização do método MeDiNa pode-se separar os materiais de pavimentação em grupos, quais sejam: (1) materiais asfálticos; (2) materiais granulares. Para cada um desses grupos tem-se diferentes tipos de caracterizações e especificações que devem ser verificadas, por meio de ensaios normatizados, e atendidas. Quanto as misturas asfálticas, as caracterizações mínimas são: (a) módulo de resiliência (DNIT, 2018a); (b) fadiga por compressão diametral (DNIT, 2018b); (c) deformação permanente (DNIT, 2018c). Por fim, com relação ao detalhamento mínimo dos materiais granulares tem-se: (d) módulo de resiliência (DNIT, 2018d); (e) deformação permanente (DNIT, 2018e).

Do ponto de vista da utilização do método MeDiNa para o dimensionamento dos pavimentos avaliados nesse trabalho, pode-se especificar as seguintes etapas: (1) determinar os materiais das camadas do pavimento; (2) determinar o período de avaliação; (3) determinar o tráfego de solicitação; (4) estabelecer espessuras para as camadas; (5) calcular o desempenho de cada pavimento para cada critério de ruptura; (6)

verificar se os arranjos de camadas (materiais e espessuras) atendem aos critérios de ruptura para o período de análise.

4.3.3 Inputs do dimensionamento

Os parâmetros necessários para a utilização do método MeDiNa são de três espectros: (1) planejamento; (2) tráfego; (3) materiais. No que se refere ao primeiro item, devem ser estabelecidos: (a) o período de projeto, que no caso desse estudo representa a vida útil que se deseja obter para um dado pavimento; (b) o tipo de via, que está relacionado ao tipo de função que a via em dimensionamento exercerá na rede rodoviária. Esse critério é de suma importância, pois ele estabelece os limites para o fim da vida útil do pavimento, quer seja por fadiga ou deformação permanente. Quanto ao segundo aspecto de variáveis de entrada do MeDiNa, são essenciais: (c) o Volume Médio Diário Anual (VMDA) previsto como demanda para a via; (d) o Fator de Veículos (FV) que é consequência do tipo de frota solicitante, e considera o tipo de veículos e os pesos transportados estes; (e) a Taxa de Crescimento do Tráfego, que é a porcentagem anual de crescimento do VMDA. Por último, com relação aos materiais, estes devem ser caracterizados segundo os critérios descritos na seção 4.4.1 desse trabalho (DNIT, 2021).

4.3.4 Outputs do dimensionamento

Os resultados do dimensionamento de um pavimento segundo o método MeDiNa e que são relevantes para a utilização do método de ACV proposto por esse trabalho são: (1) as espessuras das camadas; (2) as curvas de previsão de áreas trincadas; (3) as curvas de previsão do afundamento de trilha de roda.

As espessuras que foram determinadas ao final do processo de dimensionamento, juntamente com as características geométricas da seção transversal no que diz respeito a largura do pavimento servirão para o estabelecimento dos quantitativos dos insumos, materiais e serviços para cada uma das etapas do ciclo de vida que se deseja avaliar, no caso: exploração, fabricação/usinagem e construção. As curvas, tanto as associadas a fadiga quanto as que refletem o comportamento plástico, servem para indicar o fim da vida útil do pavimento e possibilitar a comparação dos desempenhos mecânicos e desempenhos ambientais das diferentes alternativas de projeto.

4.5 Levantamento de inventário de serviços e processos

Essa fase do procedimento visa a enumeração e quantificação de todos os serviços e processos que ocorrem durante as etapas do ciclo de vida do pavimento que se deseja analisar. No caso desse estudo, o procedimento se restringe as etapas: (a) exploração dos insumos e matérias primas; (b) usinagem ou processamento de materiais; (c) construção das camadas do pavimento; (d) transporte de insumos e materiais.

Para a realização dessa tarefa de forma padronizada e verificável, propõem-se a utilização do Sistema de Custos Rodoviários (SICRO), que apresenta as metodologias e os critérios adotados para o cálculo dos custos unitários dos insumos e serviços necessários à execução das obras de construção, restauração e sinalização rodoviária e dos serviços de conservação rodoviária (BRASIL, 2017).

A base metodológica do sistema SICRO utiliza o conceito de composições de custos, que é uma forma de modelar a execução de um determinado serviço com o objetivo de identificar as principais informações do processo para sua precificação. Para tanto, são necessários conhecimentos tais quais: (1) o tipo de maquinário necessário para a realização de cada serviço; (2) produção das equipes mecânicas para cada serviço; (3) especificações dos insumos; (4) consumos dos materiais e insumos; (5) taxas de utilização de equipamentos; (6) atividades auxiliares; (7) tempos fixos de carga, descarga e manobra; (8) momentos de transporte. Essas informações são baseadas em premissas obtidas a partir de informações técnicas, especificações de serviços, manuais, catálogos, observações de campo e procedimentos executivos que contemplam critérios técnicos de racionalidade, eficiência e economicidade (BRASIL, 2017).

A partir da definição dos materiais que compõem as camadas do pavimento e de suas espessuras, considerando-se a unidade funcional para esse trabalho de um quilometro construído, cria-se um inventário de serviços e processos com as quantidades de cada um necessária a exploração dos insumos, fabricação e usinagem dos materiais propriamente ditos, bem como das técnicas construtivas que serão utilizadas em cada etapa do ciclo de vida do pavimento.

4.6 Determinação do inventário de análise de ciclo de vida

A finalidade dessa seção demonstrar a elaboração de um inventário de serviços e processos que possa ser convertido em impactos ambientais. No caso desse trabalho, avaliações voltadas a impactos ambientais intermediários. A sequência de procedimentos é apresentada a seguir:

- (1) A partir da associação dos resultados dos dimensionamentos dos pavimentos, no caso dessa tese, realizados com o método MeDiNa, e dos parâmetros geométricos da via determina-se as quantidades de material necessário para a construção de cada camada do pavimento a ser analisado;
- (2) Por meio da utilização das composições do SICRO, faz-se o levantamento dos serviços e processos necessários a exploração, fabricação e construção dos pavimentos a que se deseja analisar;
- (3) A fim de se determinar os impactos ambientais associados aos passos anteriores, deve-se selecionar em uma base de dados os processos que melhor representem os quesitos levantados nas etapas “1” e ”2”. No caso dessa tese, a base de dados foi a *Ecoinvent*®.

4.7 Determinação da Análise de Impacto de Ciclo de Vida

O propósito dessa etapa do trabalho é evidenciar como é feita a conversão do inventário de ciclo de vida em cada uma das categorias de impactos ambientais intermediários de interesse. Para tanto, é necessária a utilização de um *software* que:

- (1) possua uma interface que possibilite a modelagem produção do sistema fundamentadas nas bases de dados das etapas anteriores;
- (2) disponha de uma equação em sua biblioteca interna ou possibilite a implementação das equações dos métodos de análise de ciclo de vida;
- (3) tenha ferramentas de cálculo para determinação dos impactos ambientais dos processos modelados nas bases de dados por meio da aplicação dos métodos de análise de impacto de ciclo de vida;
- (4) detenha ferramentas para análise dos resultados.

Nessa tese o *software* SimaPro foi utilizado para realizar a integração entre a base de dados, *Ecoinvent*®, utilizada para representar os conjuntos de processos necessários

para a exploração, fabricação e construção dos pavimentos analisados nesse estudo. Quanto ao método de análise de ciclo de vida adotado para determinação dos impactos ambientais tem-se o ReCiPe (H) versão 1.07.

4.8 Determinação dos indicadores de desempenho ambiental

Essa etapa tem a função de integrar os resultados que efetivamente possibilitarão a comparação de alternativas. Os produtos a serem mesclados dizem respeito: (1) às características do projeto geométrico da rodovia; (2) aos desempenhos mecânicos dos pavimentos; e (3) às estimativas dos impactos ambientais do ciclo de vida dos pavimentos. Dessa forma, pode-se criar indicadores com diversas unidades funcionais, tais quais: (a) emissões de toneladas de CO₂ equivalente por quilômetro construído versus a temperatura de usinagem; (b) emissões de quilos de CO₂ equivalente por tonelada de concreto betuminoso usinado a quente construído versus a temperatura de usinagem.

4.9 Considerações iniciais

Nesse capítulo serão apresentados e discutidos os resultados da aplicação do método proposto no capítulo 4 para demonstrar o efeito da temperatura de usinagem de misturas asfálticas no ciclo de vida de pavimentos rodoviários quanto às mudanças climáticas. Para tanto, foram elaborados cenários para pavimentos que abrangiam: 4 tipos de misturas asfálticas diferentes para a construção de revestimentos; 1 tipo de base; 1 tipo de sub-base; serviço de imprimação; um período de projeto; 2 volumes médios diários (VMD) de tráfego.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Exposição dos dados

Para a elaboração desse trabalho foram concebidos 8 cenários. A todos os cenários era comum: as espessuras de base e sub-base, 15 cm para ambas as camadas; os materiais da base e sub-base, brita graduada (BGS) e solo estabilizado granulometricamente, respectivamente; serviço de imprimação; 7,2 m de largura da plataforma a ser construída; 1 km de comprimento do trecho a ser construído; o período de projeto de 10 anos; a taxa de crescimento anual do volume de tráfego de 0%; o tipo de via adota para do dimensionamento no *software* MeDiNa foi o sistema arterial primário de um pavimento novo. Os parâmetros que mudavam entre os cenários eram: os tipos de mistura asfáltica para os revestimentos; os VMDs, 1.350 ($N=4,93 \times 10^6$) ou 2.700 ($N=9,86 \times 10^6$); as espessuras de cada camada de revestimento, consequência dos dimensionamentos. A Figura 5-1 ilustra os pavimentos utilizados nos cenários desse trabalho e a Figura 5-2 representa a plataforma adotada na unidade funcional.

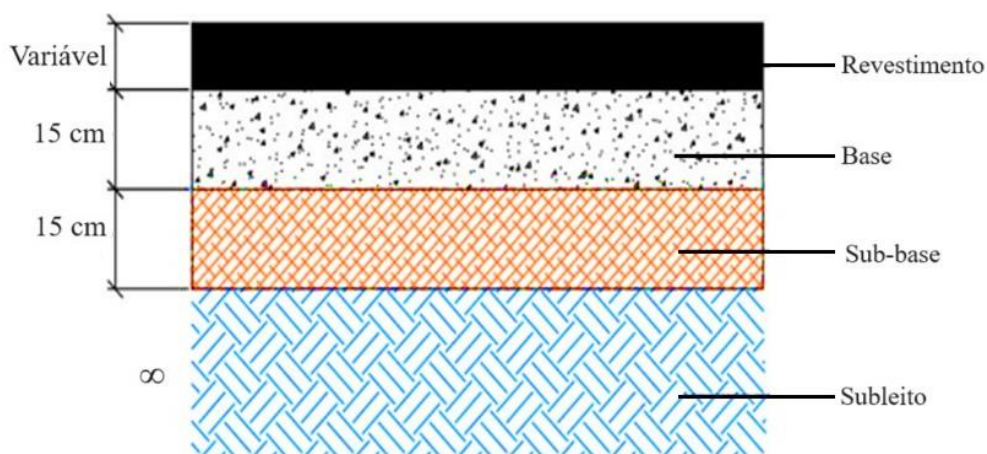


Figura 5-1 – Ilustração do pavimento rodoviário.

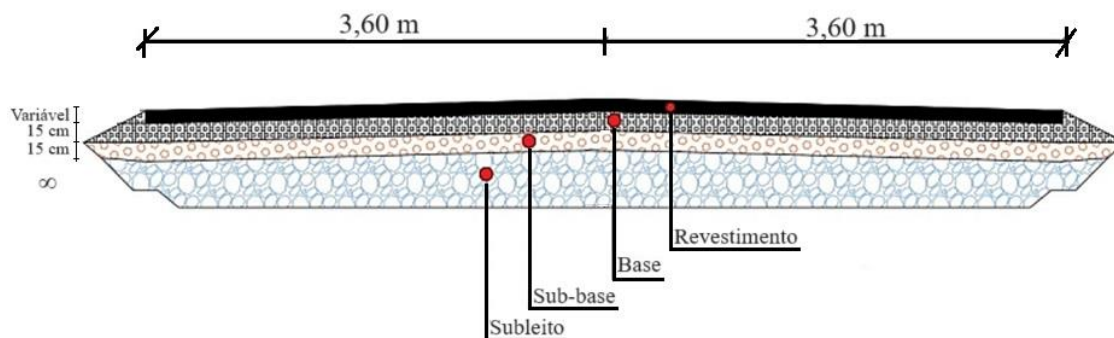


Figura 5-2 – Ilustração da plataforma adotada para a elaboração dos cenários.

A origem dos materiais utilizados para a elaboração dos cenários utilizados nesse estudo é diversa. Os materiais adotados para as camadas de base, sub-base e subleito são da própria base de dados de materiais de *software* MeDiNa. Quanto as misturas asfálticas, foram adotadas misturas desenvolvidas e analisadas os trabalhos de FLÔRA, 2018 e CCR, 2010. A caracterização mecânica de cada um desses materiais, necessária para o dimensionamento dos pavimentos propostos para cada cenário, está descrita no ANEXO I desse trabalho nas tabelas numeradas de I a VII. A tabela **Tabela 5.1** os materiais que compõem os revestimentos e os volumes de tráfego adotados para cada cenário, uma vez que os demais parâmetros são os mesmos, apenas variando quantitativamente.

Tabela 5.1 – Descrição dos cenários.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
VMD	1.350	1.350	1.350	1.350	2.700	2.700	2.700	2.700
Revestimento	CAP 30/45	CAP 50/70	CAP SBS	CAPFL EX	CAP 30/45	CAP 50/70	CAP SBS	CAPFL EX

Para determinação dos serviços e processos necessários para a construção de cada camada dos pavimentos propostos utilizou-se o SICRO 3 (2023) referente ao estado do Rio de Janeiro com dados coletados no mês de janeiro de 2023. Os códigos, nomenclaturas e descrições que referenciam os materiais tomados como parâmetro para a elaboração dos cenários são apresentados na **Tabela 5.2**.

Tabela 5.2 – Relação de materiais adotados na elaboração dos cenários segundo SICRO.

CAMADA	DESCRIÇÃO	SICRO
Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	4011463
Revestimento	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	4011466
Revestimento	Concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial	4011471
Imprimação	Imprimação com asfalto diluído	4011351
Base	Base ou sub-base de brita graduada executada com vibrocabadora - brita comercial	4011549
Sub-base	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida	4011227

Fonte: adaptado de SICRO 3 (2023).

No APÊNDICE A desse trabalho, das tabelas A.8 a A.18 pode-se observar as quantidades de cada serviços e processos necessários para as etapas do ciclo de vida do pavimento que, nesse trabalho se restringem as fases de extração e fabricação e transporte de insumos, processos da usina de asfalto e construção dos pavimentos propriamente dita de cada cenário.

A caracterização dos processos e serviços necessários a concretização dos cenários de acordo com SICRO (2023) para a AICV foi realizada por meio de processos retirados da base de dados Ecoinvent. Essa representação pode ser observada das Tabela 5.3 a Tabela 5.8. Por meio do carregamento das caracterizações das camadas de cada cenário no *software* SimaPro possibilitaram a determinação das contribuições de cada pavimento para as mudanças climáticas. Como pode-se observar, os códigos selecionados da base de dados da Ecoinvent para representar os processos e serviços do SICRO seguem a metodologia *APOS* e *UNIT* “U”. Com relação a consideração dos transportes necessários a cada etapa, preferiu-se a utilização de processos que tivessem o subtipo *MARKET*, ou seja, processos que já têm serviço de transporte incorporado. Quando esse tipo de processo não se encontrava disponível, isto é, processos com o subtipo *TRANSFORMATION*, o transporte era considerado separadamente. A preferência por processos que considerassem o maior número de operações sem a necessidade de conexão de processos se deve ao fato de tentar garantir uma maior representatividade, uma vez que os diferentes processos associados podem ter origens distintas dentre outras diferenças. Por fim, sempre que possível, selecionou-se dados coletado nacionalmente.

Tabela 5.3 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para o revestimento com código 4011463 no SICRO.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	-
	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U
1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U

Tabela 5.4 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para o revestimento com código 4011466 no SICRO.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent
1. Revestimento	4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	-
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U
	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U
1.3 Transporte para a usina de asfalto	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U
	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW	
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U
1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U

Tabela 5.5 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para o revestimento com código 4011471 no SICRO.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent
1. Revestimento	4011471	Concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial	-
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
	M0028	Pó de pedra	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U
1.2 Extração e fabricação de insumos	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U
1.3 Transporte para a usina de asfalto	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW	
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U
1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U

Tabela 5.6 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para a imprimação com código 4011351 no SICRO.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent
2. Imprimação	4011351	Imprimação com emulsão asfáltica	-
2.1 Extração e fabricação de insumos	M0104	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (betume)	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U
	M0104	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (querosene)	Kerosene {BR} market for kerosene APOS, U
2.2 Transporte para a obra	-	O SICRO não quantifica o transporte do asfalto diluído (Usina até o local da construção)	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U
2.3 Execução do serviço	E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U

Tabela 5.7 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para a base com código 4011549 no SICRO (contínua).

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent
3. Base	4011549	Base ou sub-base de brita graduada executada com vibroacabadora - brita comercial	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
3.1 Extração, fabricação de insumos e transporte para usina de solos	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
	M0192	Brita 2	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
	M1135	Pó de pedra	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U
3.2 Fabricação na usina de solos	E9615	Usina misturadora de solos com capacidade de 300 t/h - 44 kW	Machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,40 m³ - 195 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
3.3 Transporte para a obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U
3.5 Construção da Camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9779	Grupo gerador - capacidade 113 KVA - Potência 84 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U

Tabela 5.7 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para a base com código 4011549 no SICRO (continuação).

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent
3.5 Construção da Camada	E9530	Rolo compactador liso auto propelido vibratório de 11 t - 97 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U

Tabela 5.8 – Representação dos processos na base de dados Ecoinvent para a sub-base com código 4011227 no SICRO.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent
4. Sub-base	4011227	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida.	
4.1 Extração e fabricação de insumos	E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m³ - 118 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
4.2 Transporte de material na obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U
	E9524	motoniveladora - 93 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9762	rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
4.3 Construção da camada	E9685	rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9577	trator agrícola sobre pneus - 77 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U
	E9571	caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U

5.2 Dimensionamento mecanístico-empírico

Os resultados da aplicação das condições de contorno no dimensionamento dos revestimentos dos pavimentos constituintes de cada um dos cenários propostos segundo descrito no item A.1 do APÊNDICE A desse trabalho, podem ser observados nas

Tabela 5.9 e Tabela 5.10. Nota-se que as diferentes intensidades de carregamentos influenciaram de forma distinta a espessura das camadas de revestimento de cada cenário.

Considera-se que a passagem do tráfego de veículos gera aos revestimentos asfálticos flexões repetidas que provocam esforços de tração e compressão que ocasionam trincamentos por fadiga. Outras solicitações causadas são os esforços de cisalhamento e compressão verticais que acumulam deformações permanentes (MOTTA e PINTO, 1994).

Kim (2009), argumenta que o desempenho mecânico das concretos usinados a quente são influenciados por diversos fatores, quais sejam: taxa de deformação; temperatura de usinagem; estado de tensões; distribuição granulométrica dos esqueleto pétreo; tipo de ligante; película de ligante asfáltico que envolve os grãos dos agregados minerais; índice de vazios; presença de finos; graus de envelhecimento do ligante; adição de modificadores de ligante. Alguns desses parâmetro são definidos na dosagem das misturas asfálticas. Especificamente sobre o teor de ligante na mistura segundo Monismith et al (1988) Tal aumento do teor de ligante tende a melhorar o desempenho de misturas quanto à fadiga, mas tende a diminuir a resistência à deformações permanentes.

Quando a solicitação aplicada aos pavimentos foi um VMD de 1350, ao se apresentar os cenários de acordo com ordem crescente de espessuras de revestimento tem-se: 1, 2, 3 e 4. No entanto, observa-se que essa ordem tende a ser inversamente proporcional aos módulos resilientes das misturas asfálticas que os compõem, contudo, no caso dos cenários 3 e 4 essa afirmação pode não ter sido verificada pelo fato de ser necessário arredondamentos das espessuras para valores múltiplos de 5 milímetros e da proximidade de seus módulos resilientes. Ademais, ressalta-se que, diferente dos cenários 1, 2 e 3, o cenário 4, teve sua espessura restringida pelo limite de afundamento de trilha de roda (ATR) e não pelo limite de área trincada (AT).

Tabela 5.9 – Revestimentos para cada cenário dimensionados para VMD de 1350.

	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3			Cenário 4		
	CAP 30/45			CAP 50/70			CAP SBS			CAPFLEX		
VMD	AT	ATR	e	AT	ATR	e	AT	ATR	e	AT	ATR	e
	(%)	(mm)	(cm)	(%)	(mm)	(cm)	(%)	(mm)	(cm)	(%)	(mm)	(cm)
1350	28,2	9,6	7,0	29,3	7,1	10,0	27,5	9,8	11,0	16,5	9,5	11,5

Nos casos em que os cenários foram submetidos a um carregamento diário de 2700, nota-se que a sequência de cenários não obedece ao módulo resiliente como no caso anterior. Além disso, observa-se que os diferentes revestimentos apresentaram incrementos em suas espessuras para um mesmo aumento de demanda de tráfego. Por fim, destaca-se que desta vez, todas as espessuras foram estabelecidas pela AT.

Tabela 5.10 – Revestimentos para cada cenário dimensionados para VMD de 2700.

	Cenário 5			Cenário 6			Cenário 7			Cenário 8		
	CAP 30/45			CAP 50/70			CAP SBS			CAPFLEX		
VMD	AT	ATR	e	AT	ATR	e	AT	ATR	e	AT	ATR	e
	(%)	(mm)	(cm)	(%)	(mm)	(cm)	(%)	(mm)	(cm)	(%)	(mm)	(cm)
2700	29,0	4,5	12,0	29,1	4,1	15,0	29,8	5,9	17,0	29,5	8,4	13,5

5.3 Inventário de ciclo de vida (ICV)

Nessa seção são apresentadas as condições de contorno necessárias para determinação das quantidades de cada processo de cada etapa dos ciclos de vida de cada camada de cada pavimento que compõem os cenários elaborados para esse estudo.

Nas etapas de extração, fabricação e transporte de material britado (brita 0, brita 1, brita 2, pedrisco e pó de pedra) entre os locais de produção e os locais de utilização (usinas de asfalto ou usinas de solos), as distâncias médias de transporte (DMT) consideradas foram de 23,8 quilômetros. Quanto ao transporte da areia obtida pelo processo de dragagem, considerou-se uma DMT de 10 quilômetros. Para disponibilização da cal hidratada na usina de asfalto foi considerada uma DMT de 20 quilômetros. Uma ilustração do processo de extração, fabricação e transporte da cal hidratada até a usina de asfalto é apresentada na Figura 5-3.

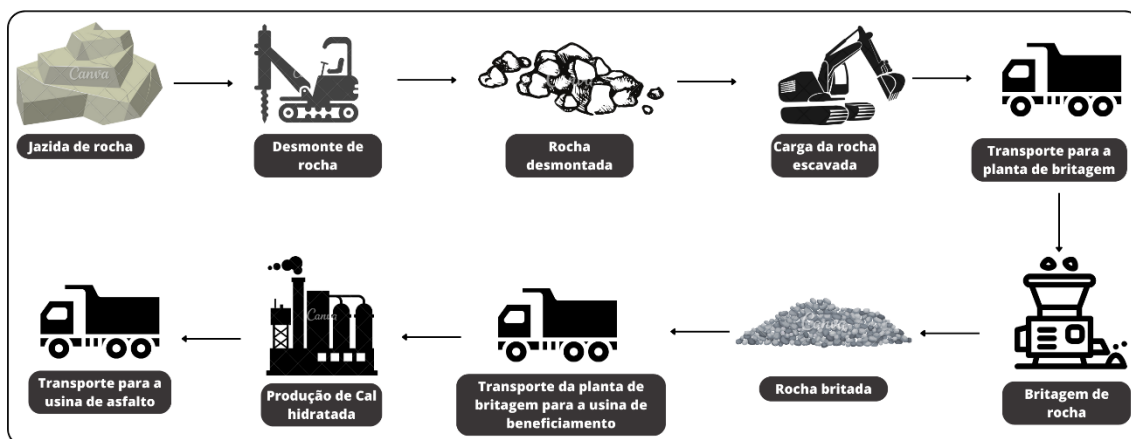


Figura 5-3 – Ilustração das fases de extração, fabricação e transporte de cal hidratada para a usina de asfalto.

No processo de obtenção do asfalto, incluindo-se todas as etapas desde a extração do petróleo até a disponibilização do cimento asfalto de petróleo na usina de asfalto, a DMT até a refinaria foi de 300 quilômetros e a DMT da refinaria para usina de asfalto foi de 70 quilômetros. Ressaltasse que para essa pesquisa optou-se por uma caracterização uniforme de todos os cimentos asfálticos quanto ao inventário de ciclo de vida nas etapas de extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto. Quanto ao asfalto utilizado para a o serviço de imprimação adotou-se uma DMT de 50 quilômetros.

Quanto as etapas de usinagem de misturas e transporte de misturas asfálticas para a obra e construção propriamente dita dos revestimentos considerou-se uma DMT de 10 quilômetros para todos os cenários. A Figura 5-4 apresenta uma ilustração dos processos envolvidos na construção das camadas de revestimento dos cenários desse trabalho.

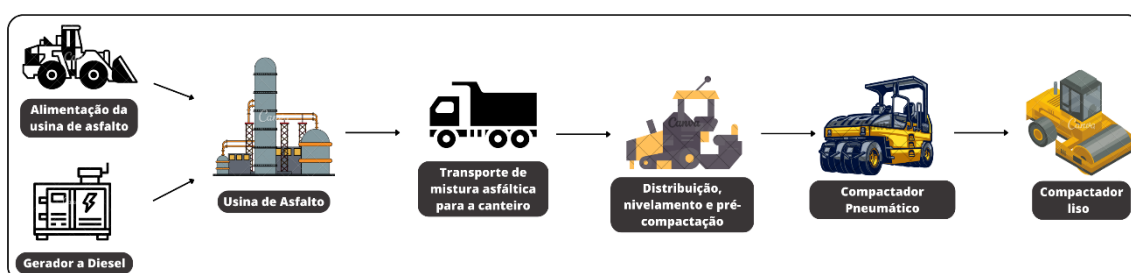


Figura 5-4 – Ilustração do processo de usinagem e transporte da mistura asfáltica para a obra e construção de revestimento para todos os cenários.

No que diz respeito as fases de preparo da mistura na usina de solos, transporte de material e da construção propriamente dita da camada de base considerou-se uma DMT de 25 quilômetros. A Figura 5-5 ilustra do processo de fabricação e transporte da mistura de solos para obra e construção propriamente dita.

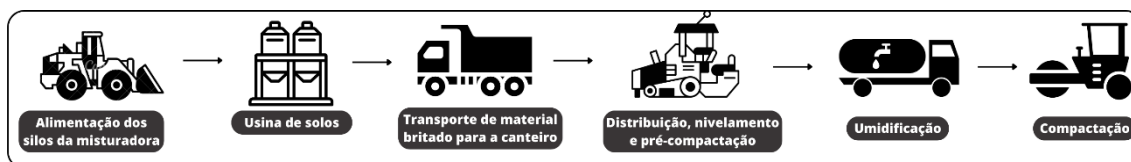


Figura 5-5 – Ilustração do processo de fabricação e transporte da mistura de solos para obra, além da construção propriamente dita da camada de base dos cenários.

Por fim, quanto as etapas de escavação e construção da camada de sub-base considerou-se uma DMT de 1,5 quilômetros e A Figura 5-6 ilustra esse processo.

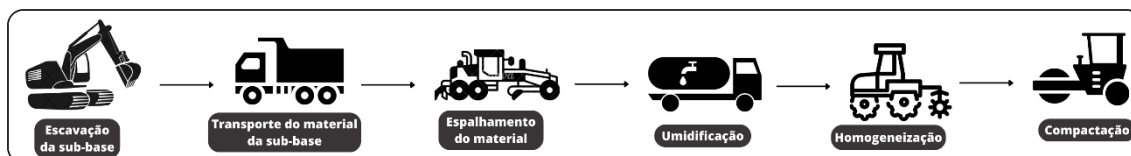


Figura 5-6 – Ilustração dos processos de escavação e construção da camada de sub-base para todos os cenários.

Como resultados de todo esse processo de inventariado, tem-se a elaboração das planilhas A.19 a A.29 apresentadas no APÊNDICE A item A.5 desse trabalho, são apresentadas as quantidades necessárias de cada processo selecionado da base de dados Ecoinvent para a concretização de cada cenário.

5.4 Análise de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Os somatórios das contribuições para as mudanças climáticas de cada etapa do ciclo de vida de cada camada do pavimento ou serviço de imprimação necessários para a construção de um quilômetro de pavimento segundo as condições de cada cenário são expostos na Figura 5-7. Observa-se que, excetuando-se as camadas de revestimento, todos os cenários apresentam as mesmas quantidades emitidas. Isso se deve ao fato de todos os casos analisados se diferenciarem apenas quanto aos materiais constituintes das camadas de revestimento. Evidencia-se também que, para os dois tipos de carregamentos de tráfego, as emissões são diretamente proporcionais as espessuras. Contudo, evidencia-se que os diferentes tipos de revestimento reagiram de forma distinta, isto é, um mesmo incremento na solicitação do tráfego gerou acréscimos de diferentes intensidades em suas emissões de gases de efeito estufa. Nota-se, especificamente, um aumento nos lançamentos, entre os cenários 1 e 5 de 71%, entre os cenários 2 e 6 de 50%, entre os cenários 3 e 7 de 69% e entre 4 e 8 de 17%.

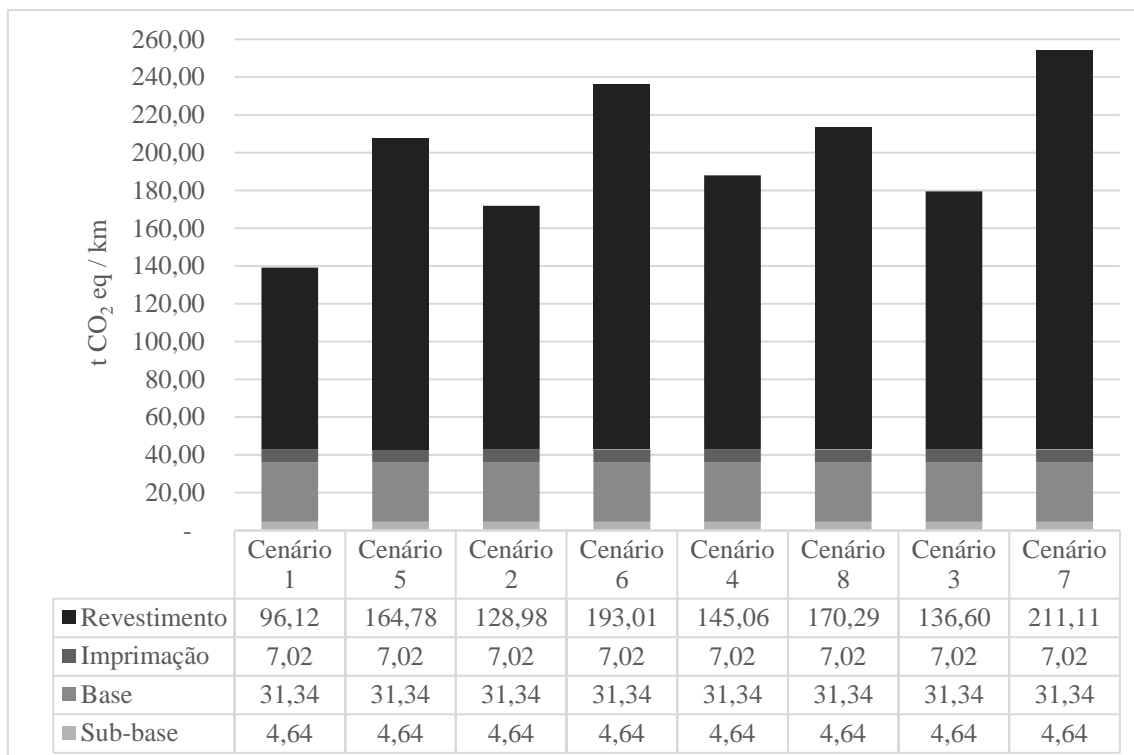


Figura 5-7 – Emissões de CO₂ equivalente dos cenários discriminadas por camada do pavimento.

A Figura 5-8 apresenta as quantidades em toneladas de CO₂ equivalente que cada etapa do ciclo de vida dos revestimentos de cada cenário vai emitir. Observa-se, para todos os cenários, que as contribuições percentuais das etapas de extração, fabricação e transporte de insumos para a usina de asfalto correspondem taxas entre 55% e 60% das emissões dos gases de efeito estufa (GEE). Nota-se também, que a ejeção de CO₂ equivalente durante as fases de usinagem de mistura de asfalto equivalem a limites entre 33% e 38%. Outra situação que se verifica é que os lançamentos associados as etapas de transporte da usina de asfalto para o local da obra e a construção propriamente dita são 2% e 5%, respectivamente das emissões totais de cada revestimento.

Ainda analisando a Figura 5-8, outra questão a ser ressaltada é que, em termos absolutos de emissões, para os cenários dimensionados para o menor VMD, os melhores e o piores pavimentos tiveram os melhores e piores menores e maiores emissões em todas as etapas do ciclo de vida dos revestimentos respectivamente, quando comparados aos cenários do mesmo grupo de solicitação de tráfego. Contudo, para o melhor cenário dimensionado para um VMD de 2700, nota-se que este não apresentou o melhor desempenho absoluto para todas as etapas, mas, por outro lado, o pior cenário para essa mesma condição de trânsito, teve os maiores lançamentos de CO₂ equivalente.

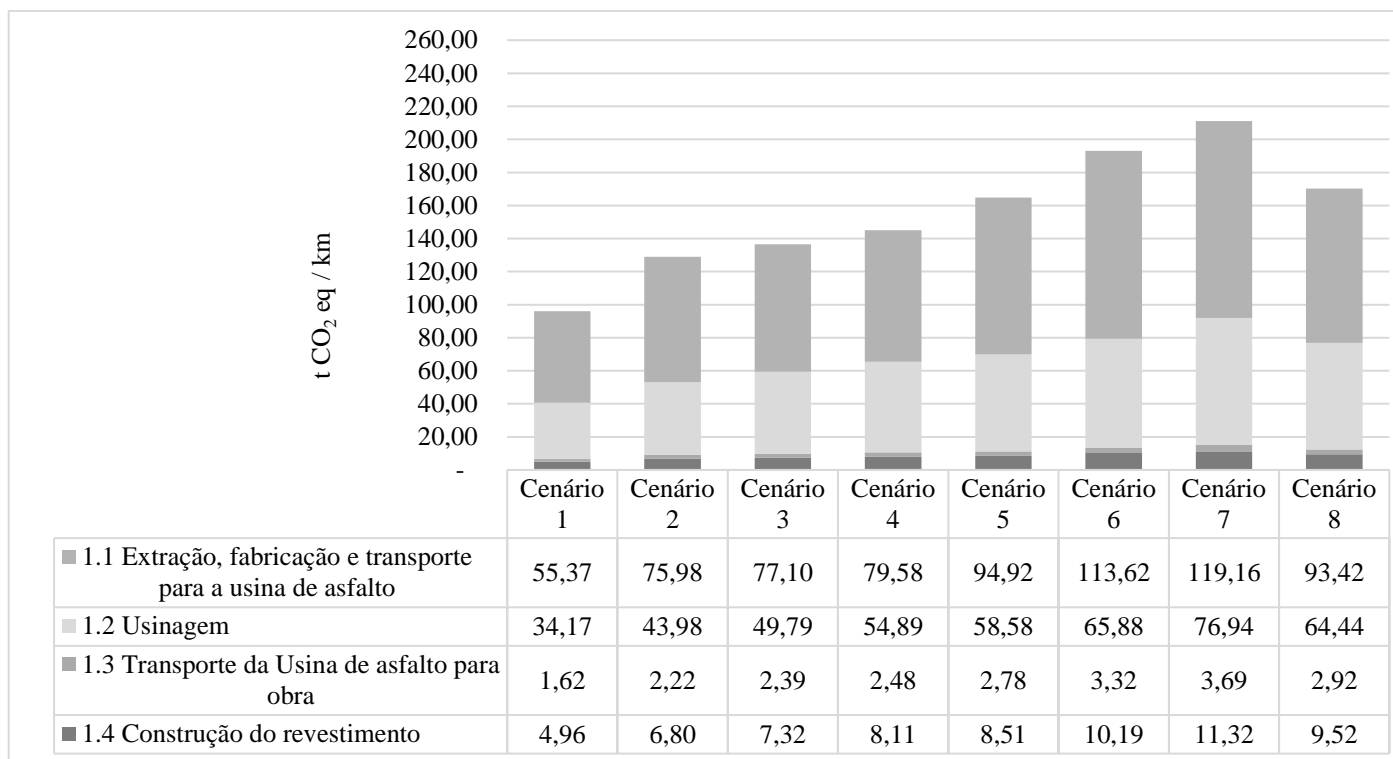


Figura 5-8 – Emissões de CO₂ equivalente dos cenários discriminadas por etapa do ciclo de vida da camada dos revestimentos.

5.5 Indicador de Desempenho Ambiental

A Figura 5-9 apresenta as emissões de CO₂ equivalente associadas aos processos de secagem e aquecimento dos agregados em uma usina gravimétrica para misturas asfálticas com diferentes temperaturas de usinagem. Pode-se observar que a temperatura de usinagem interfere nas quantidades de gases de efeito estufa lançadas, tanto nos cenários dimensionados para um VMD de 1350 quanto para um VMD de 2700. Porém, nota-se que nem as maiores ejeções estão necessariamente atreladas as maiores temperaturas de usinagem, tão pouco as menores obrigatoriamente vinculadas as menores temperaturas de usinagem. Isso se deve ao fato dessa parcela das emissões dependerem das quantidades de materiais necessárias para cada revestimento, em outras palavras, espessura da camada do revestimento que depende de seu comportamento mecânico.

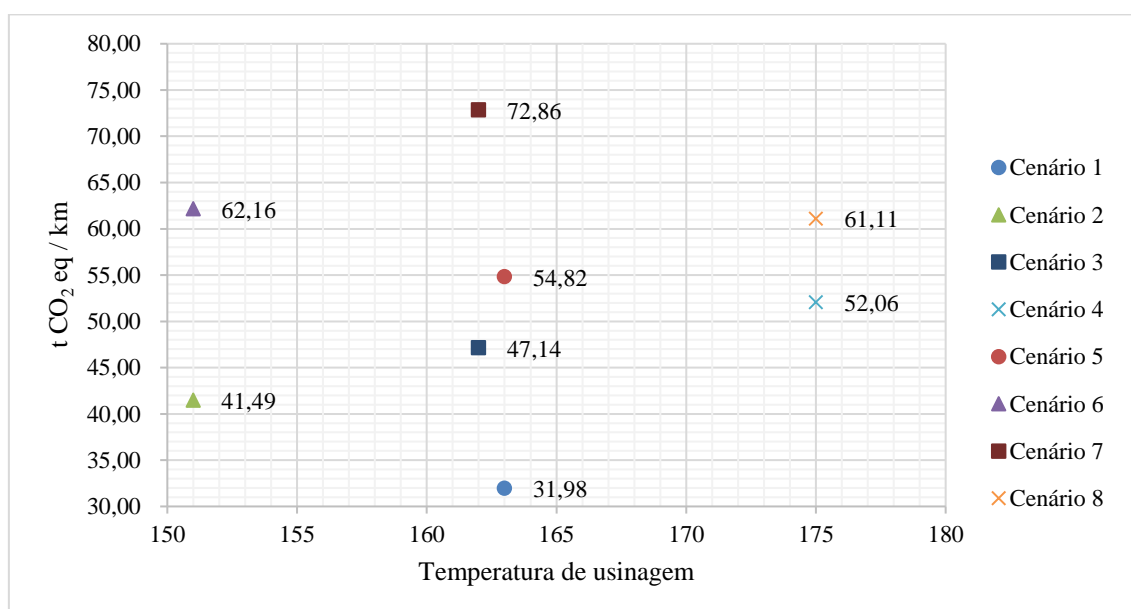


Figura 5-9 – Quantidades de CO₂ equivalente emitidas pelos processos de secagem e aquecimento dos agregados mineiros e aquecimento dos ligantes na usinagem de misturas asfálticas versus suas temperaturas de usinagem.

Na Figura 5-10 está exposto o total de toneladas de CO₂ equivalente emitido por cada revestimento asfáltico e suas temperaturas de usinagem. Observando-se a Figura 5-10 uma hierarquização em ordem crescente dos cenários menos impactantes para os mais impactantes com base no indicador proposto (t de CO₂ equivalente / km construído) para os pavimentos dimensionados para o tráfego com VMD de 1350 seria: 1, 2, 3 e 4. Para os cenários dimensionados para um VMD de 2700, a hierarquização teria o arranjo: 5, 8, 6 e 7. Observa-se que para esse indicador o VMD causou uma alteração na ordem da hierarquização dos cenários das misturas asfálticas elaboradas com os mesmos

componentes. Esse resultado demonstra como a hierarquização pode ser sensível a variação da demanda de tráfego, uma vez que essa influencia nas espessuras dos revestimentos asfálticos.

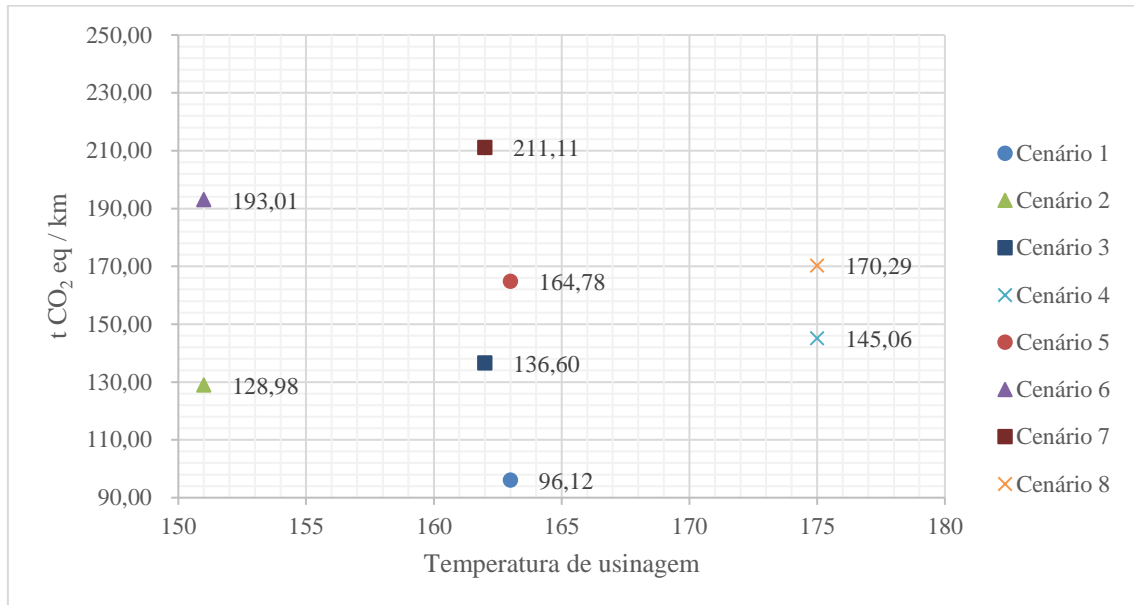


Figura 5-10 – Quantidades de CO₂ equivalente emitidas pelos revestimentos asfálticos versus suas temperaturas de usinagem.

A partir da análise conjunta da Figura 5-10 e da Figura 5-9 pode-se observar que somente a temperatura não é capaz de determinar qual mistura asfáltica ou pavimentos contribuirá mais para as mudanças climáticas.

Com base nas análises dos desempenhos ambientais dos cenários das misturas asfálticas elaboradas para essa tese e, considerando que as misturas asfálticas fazem parte de uma estrutura maior dividida em camadas denominada de pavimento, determinada a resistir e absorver os esforços gerados pela passagem do tráfego de veículos, conclui-se que a hierarquização de misturas asfálticas ambientalmente eficientes depende de sua situação de solicitação durante a vida útil, ou seja, é necessário dimensionar cada pavimento com cada alternativa de concreto betuminoso usinado a quente para se determinar a melhor opção.

5.6 Comportamento ambiental das misturas asfálticas

Apresenta-se nessa etapa os indicadores propostos para os impactos ambientais com o objetivo de facilitar o entendimento do comportamento das misturas asfálticas quanto as emissões de gases de efeito estufa em função das temperaturas de usinagem e para a unidade funcional que é o CO₂ equivalente / tonelada de concreto betuminoso usinado a quente para a construção de um quilometro submetido a uma dada solicitação de tráfego (CO₂ eq. / t CBUQ).

A Figura 5-11 apresenta as emissões de CO₂ equivalente por tonelada de CBUQ para cada cenário referentes aos processos de secagem e aquecimento dos agregados das misturas asfálticas, bem como o aquecimento dos ligantes asfálticos de cada mistura associados as suas temperaturas de usinagem. Observa-se que, como esperado, quanto maior a temperatura, maiores as contribuições para as mudanças climáticas. Além disso, nota-se que os incrementos nas emissões de gases de efeito estufa nos cenários associados as temperaturas de 162°C e 163°C com relação aos cenários relacionados a temperatura de usinagem de 151°C é de 6%. Por outro lado, o aumento das emissões referentes a temperatura de usinagem de 175°C comparativamente as ejeções das misturas de 151°C é de 12%. Esse fenômeno pode ser explicado pela própria formulação da equação adotada na seção A.2 do APÊNDICE A, que depende de condições como teores de ligantes das misturas e teores de umidade dos agregados.

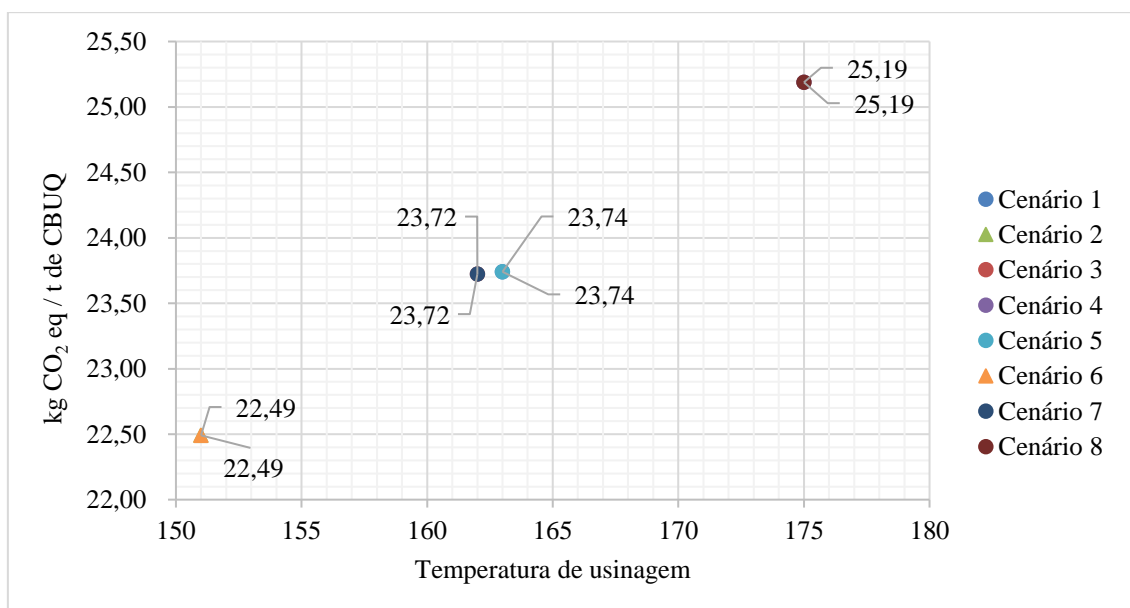


Figura 5-11: Quantidades de CO₂ equivalente emitidas pelos processos de secagem, aquecimento dos agregados e aquecimento dos ligantes na usinagem de misturas

asfálticas por tonelada de concreto betuminoso usinado a quente executado em campo versus suas temperaturas de usinagem para cada cenário.

As Figura 5-12 apresenta as quantidades de CO₂ equivalente emitidas pela totalidade de processos necessários para a obtenção de uma tonelada de concreto betuminoso usinado a quente para cada um dos cenários propostos por essa tese. Os valores expostos nesses gráficos foram calculados dividindo-se as emissões totais referentes aos processos das camadas de revestimento pelas quantidades de concreto betuminoso usinado a quente para cada cenário.

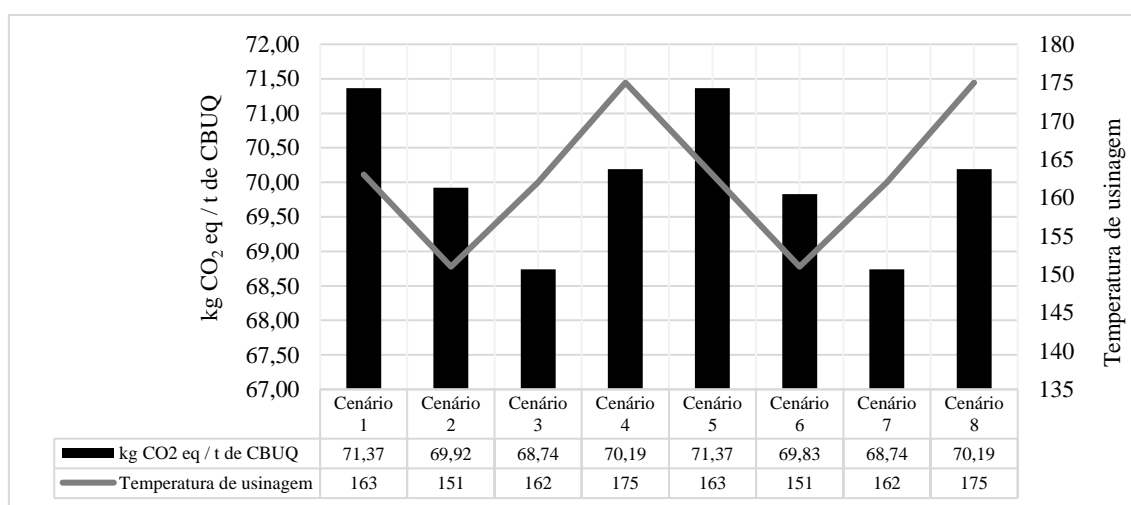


Figura 5-12: Quantidades de CO₂ equivalente emitidas pelos revestimentos asfálticos por tonelada de concreto betuminoso usinado a quente executado em campo dimensionados os VMD de 1350 e 2700 versus suas temperaturas de usinagem para cada cenário.

Na Figura 5-12, para os dois casos de VMD, pode-se observar que a maior emissão de gases de efeito estufa por tonelada de CBUQ não está associada a maior temperatura de usinagem. Por outro lado, a menor contribuição para as mudanças climáticas também não está associada a menor temperatura de usinagem.

A situações expostas no parágrafo anterior podem ser explicadas pela análise conjunta dos resultados apresentados nas

Tabela 5.9, nas tabelas de I a IV do anexo I desse trabalho e nas tabelas A.30 a A.37 do APÊNDICE A desse trabalho que explicitam que as emissões associadas aos processos de secagem e aquecimento dos agregados minerais e aos processos de aquecimento dos ligantes asfálticos constituintes das misturas asfálticas compõem entre 32% e 36% das emissões de CO₂ equivalente emitido por tonelada de concreto betuminoso usinado a quente construído.

Observando-se a Figura 5-12 uma hierarquização em ordem crescente dos cenários menos impactantes para os mais impactantes com base no indicador proposto (kg de CO₂ equivalente / tonelada de concreto betuminoso usinado a quente) tanto para os pavimentos dimensionados para o tráfego com VMD de 1350 quanto para seria: 3, 2, 4 e 1. Para os cenários dimensionados para um VMD de 2700, a hierarquização teria o arranjo: 7, 6, 8 e 5. Observa-se que para esse indicador o VMD não causou uma alteração na ordem da hierarquização dos cenários quanto ao tipo das misturas asfálticas. Além disso, observa-se que as taxas de emissão para cada cenário se mantêm constantes para os mesmos tipos de materiais, mesmo que as quantidades de material necessárias para a construção das camadas de revestimento tenham sido diferentes em cada cenário, já que cada material responde de uma forma distinta as solicitações do tráfego.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse capítulo expõem as conclusões que puderam ser concebidas por esse trabalho a partir dos resultados e discussões apresentados. Além disso, são propostas sugestões para o desenvolvimento de pesquisas posteriores.

6.1 Considerações finais e limitações

A partir da análise do trade-off entre o consumo energético necessário para os processos de preparo das misturas asfálticas associados a suas temperaturas de usinagem e o seu desempenho mecânico foi possível constatar que a temperatura de usinagem exerce influência sobre os processos de hierarquizações de pavimentos asfálticos realizados por meio de Análises de Ciclo de Vida (ACV). Verificou-se também, como era de se esperar, que os quantitativos e tipos de insumos e processos necessários para se obter as toneladas de um dado tipo de revestimento também exercem efeito sobre os resultados das avaliações.

Quanto ao processo específico de secagem e aquecimento dos agregados, subordinados a temperatura de usinagem dos revestimentos, verifica-se que a temperatura de usinagem interfere nas emissões de gases de efeito estufa dos revestimentos. Portanto, cabe afirmar que a temperatura de usinagem interfere nos lançamentos de CO₂ equivalente, sendo um grande contribuinte para as emissões de gases de efeito estufa dos revestimentos com um todo. Porém, esse único parâmetro não pode ser adotado separadamente como critério de seleção de misturas asfálticas eficientes para mudanças climáticas.

Além disso, quanto a sensibilidade dos lançamentos de gases de efeito estufa de pavimentos asfálticos relacionada a variações nas solicitações dos tráfegos utilizados para seus dimensionamentos tem-se que o tráfego interfere nas espessuras como era de se esperar. Contudo, dependendo da ordem de grandeza da solicitação de tráfego, pode-se observar mudanças nas emissões atmosféricas suficientes para inverter um possível ordenamento quanto aos desempenhos ambientais.

Desse modo, fica evidente que a seleção de uma determinada mistura asfáltica, a fim de se reduzir os impactos ambientais associados as mudanças climáticas, não pode se dar de forma isolada. Deve-se sim, considerar a implantação do pavimento asfáltico como

um todo, pois, em última análise as camadas trabalham de forma integrada e as espessuras do revestimento dependem das demais camadas bem como das solicitações a que o conjunto está sujeito. Esse comportamento integrado, por sua vez, pode trazer vantagens ou desvantagens para características específicas de cada mistura que quando analisadas separadamente podem levar a juízos equivocados, como é o caso de contribuições de pavimentos para as mudanças climáticas.

6.2 Proposições para novos estudos

Com base no que foi exposto e discutido como sugestões para trabalhos futuros se propõem o estudo de questões como:

- Incorporação de mais etapas do ciclo de vida do pavimento asfáltico com o objetivo de se verificar se haveria uma alteração na ordem entre os pavimentos com melhores desempenhos ambientais;
- Verificação da aplicabilidade de *softwares* livres específicos para a realização de análises de ciclo de vida de pavimentos para casos nacionais a fim de se baratear os custos, a promover e a disseminação da AICV de pavimentos para projetos nacionais;
- Levantamento e incorporação de uma base de dados inteiramente nacional voltada para a utilização da AICV em projetos nacionais;
- Avaliação da temperatura de usinagem e demais parâmetros das misturas asfálticas sobre outros impactos ambientais intermediários como acidificação, emissão de material particulado e eutrofização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZARIJAFARI, H.; YAHIA, A.; AMOR, M. B. “Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities”. **Journal of Cleaner Production**. 112, 2187-2197. 2016. Disponível em: DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.080
- ARAÚJO, D. L. V.; SANTOS, J.; ARGUELLES, G. M. “Life cycle assessment of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for road pavements construction”. **International journal of pavement engineering**, v. 23, n. 4, p. 923-936, 2020. DOI: 10.1080/10298436.2020.1778694.
- ARAÚJO, J.P.C., OLIVEIRA, J.R.M., SILVA, H.M.R.D. “The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements”. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**. 32, 97e110. 2014. Disponível em: DOI:10.1016/j.trd.2014.07.006.
- ARYAN, Y.; DIKSHIT, A. K.; SHINDE, A. M. “A critical review of the life cycle assessment studies on road pavements and road infrastructures”. *Journal of Environmental Management*, v. 336, p. 117697, 2023. Disponível em: DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117697.
- BABOULET, O. “Path Exchange Method for Hybrid Life-cycle Assessment Department of Energy and Process Engineering”. **Norwegian University of Science and Technology**, p. 135. 2009.
- BARE, J., C. “TRACI: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts”. **Journal of Industrial Ecology**. 6 (3-4), 49 e 78. 2002.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G. da, CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. “Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros”. 2ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 750. 2022.
- BIRGISDOTTIR, H. “Life Cycle Assessment Model for Road Construction and Use of Residues from Waste Incineration”. **Institute of Environment & Resources**. Technical University of Denmark. 2005.
- BIRGISDOTTIR, H., BHANDER, G., HAUSCHILD, M.Z., CHRISTENSEN, T.H. “Life cycle assessment of disposal of residues from municipal solid waste incineration: recycling of bottom ash in road construction or landfilling in Denmark evaluated in the ROAD-RES model. **Waste Manag**. 27 (8), S75eS84. 2007.
- BLAAUW, S., A., MAINA, J., W., GROBLER, L., J. “Life cycle inventory of bitumen in South Africa”. **Transportation Engineering**. 2. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100019>
- BRAGA, A.M., SILVESTRE, J.D., AND DE BRITO, J. “Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse

- aggregates”. **Journal of Cleaner Production**, 162, 529–543. 2017. Disponível em: doi:10.1016/j.jclepro.2017.06.057.
- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil, de 5 de outubro de 1988. Contém as emendas constitucionais posteriores. Brasília, DF: Senado, 1988.
- BRASIL, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Coordenação-Geral de Custos de Infraestrutura de Transportes. Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes. 1ª Edição - Brasília. 2017.
- BRUNDTLAND, G H; KHALID, M; AGNELLI, S; *et al.*, Our common future; by world commission on environment and development. [S.l: s.n.], 1987.
- BULLARD, C., PENNER, P.S., PILATI, D.A. “Net energy analysis - handbook for combining process and input-output analysis”. **Resources and Energy** 1, 267 e 313. 1978. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/4926918_Net_Energy_Analysis_Handbook_for_Combining_Process_and_Input-Output_Analysis
- BUTT, A.A., BIRGISSON, B., KRINGOS, N. “Considering the benefits of asphalt modification using a new technical life cycle assessment framework”. **Journal of Civil Engineering & Management**. 22 (5). 2016. Disponível em: DOI:10.3846/13923730.2014.914084.
- CARTER, W.P. L. “Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds”. **Air & waste**, v. 44, n. 7, p. 881-899. 1994.
- CCR (2010) Estudo comparativo do comportamento de fadiga de misturas betuminosas com diferentes teores de asfalto. Relatório Final. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/documents/359170/966006/Estudo+comparativo+do+comportamento+de+fadiga+de+misturas+betuminosas+com+diferentes+teores+de+asfalto+%281%29.pdf/15768439-8383-f971-8fe2-05d51303eee6?t=1593233950907>. Acesso em: 01 de julho de 2023.
- CHEN, F., ZHU, H., YU, B., WANG, H. “Environmental burdens of regular and long term pavement designs: a life cycle view”. **International Journal of Pavement Engineering** 17 (4), 300 e 313. 2016. Disponível em: DOI: 10.1080/10298436.2014.993189
- CHONG, D., WANG, Y. “Impacts of flexible pavement design and management decisions on life cycle energy consumption and carbon footprint”. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. 2017. Disponível em: DOI: 10.1007/s11367-016-1202-x
- CHONG, D., WANG, Y., DAI, Z., CHEN, X., WANG, D., OESER, M. “Multiobjective optimization of asphalt pavement design and maintenance decisions based on sustainability principles and mechanistic-empirical pavement analysis”. **International Journal of Sustainable Transportation**. 12:6, 461-472. 2018. Disponível em: [DOI: 10.1080/15568318.2017.1392657](https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1392657)

- CHOU, C.P.; LEE, N. “A sensitivity study of RAP cost and performance on its life cycle benefits”. **Advanced Materials Research**. Dept. of Civil Engineering, 1, Roosevelt Rd, Sec. 4, Taipei, Taiwan. 2013. Disponível em: [doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.723.567](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.723.567)
- CNT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE). **Boletim Estatístico, dezembro 2016**. Brasília, Brasil, [s.n.], 2016. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt> >.
- CNT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE). **Piora a qualidade das rodovias brasileiras**. Brasília, Brasil, [s.n.], 2019a. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/piora-a-qualidade-das-rodovias-brasileiras>
- CNT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE). **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília, Brasil, [s.n.], 2019b. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>.
- CONG, L., GUO, G., YU, M., YANG, F., TAN, L. “The energy consumption and emission of polyurethane pavement construction based on life cycle assessment”. **Journal of Cleaner Production**. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120395
- CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE): Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986.
- CRAWFORD, R. H. “Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method”. **Journal of Environment Management**. 88, 496-506. 2008.
- CRAWFORD, R.H. “Life Cycle Assessment in the Built Environment”. **Spon Press**, Abingdon, UK and New York, USA. 2011.
- CRAWFORD, R. H., BONTINCK, P. A., STEPHAN, A., WIEDMANN, T., YU, M. “Hybrid life cycle inventory methods e A review”. **Journal of Cleaner Production**, 172, 1273-1288. 2018.
- D’AGOSTO, M., DE A. “Transporte, uso de energia e impactos ambientais: uma abordagem introdutória”. 1ª ed, Rio de Janeiro: Elsevier. 2015.
- DNER (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM). Diretoria de desenvolvimento tecnológico. Divisão de capacitação tecnológica. Manual de projeto geométrico de rodovias rurais. Rio de Janeiro: IPR, 1999. E-BOOK. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-emanuais/manuais/documentos/706_manual_de_projeto_geometrico.pdf. Acesso em: 11 de agosto de 2022.
- DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES)

Manual de custos rodoviários. Diretoria Geral. 3. ed. - Rio de Janeiro. v.1: Metodologia e conceitos. 2003a

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES)
Manual de custos rodoviários. Diretoria Geral. 3. ed. - Rio de Janeiro. v.4: Composições de custos unitários de referência; obras de construção rodoviária. t.1: Terraplenagem e pavimentação. 2003b

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES)
Manual de Implantação básica de rodovia. Diretoria Executiva. 3. ed. - Rio de Janeiro. t.1: Rodovias – Projetos - Manuais. 2010.

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES)
Relatório dos Levantamentos Funcionais das Rodovias Federais. Brasília, DF. 2013.

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES)
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, DF. 2017.
Disponível em: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/ContagemContinua>

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES)
135/2018-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, DF. 2018a

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES)
183/2018-ME: Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, DF. 2018b

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES)
184/2018-ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, DF. 2018c

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES)
134/2018-ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, DF. 2018d

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES)
179/2018-IE- Pavimentação – Solos – Determinação de deformação permanente. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, DF. 2018e

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES)
IS 247/2021. “Estudos para elaboração de projetos de implantação usando o método de dimensionamento nacional – MeDiNa”. Rio de Janeiro. 2021.

- EC-JRC - European Commission-Joint Research Centre (2010a) - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD): Handbook General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance, 1st edn March 2010. EUR 24708 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- EC-JRC - European Commission-Joint Research Centre (2010b) - Institute for Environment and Sustainability: International Life Cycle Data System (ILCD). “Handbook - Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators”, 1st edn. **European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability**, Ispra, Italy.
- EC-JRC - European Commission-Joint Research Centre (2011) - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD): “Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context - Based on Existing Environmental Impact Assessment Models and Factors”. 1st edn 2011, EUR 24571 EN. Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- EEA (European Environment Agency). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009. Technical guidance to prepare national emission inventories. Luxembourg: Publications Office of the European Union, European Environment Agency Technical Report No. 12/2013. 2013. Disponível em: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>
- ESTANQUEIRO, B., *et al.* “Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete”. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**. 2016. Disponível em: doi:10.1080/19648189.2016.1197161.
- EUROBITME. “The Eurobitume Life-Cycle Inventory for Bitumen”. Version 3.1, **European Bitumen Association**, Brussels, Belgium. 2020.
- EVANGELISTA, L., DE BRITO, J. “Environmental Life Cycle Assessment of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates”. Portugal **Sb07-Sustainable Construction, Materials Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium**, Pts, vol. 1, pp. 789e794. 2007.
- FLÔRA, C., S., D. **Comportamento mecânico de duas misturas asfálticas com o uso de um aditivo surfactante de mistura morna**. Dissertação de M.Sc, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- GOEDKOOP M., HOFSTETTER P., MÜLLER-WENK R. AND SPRIENSMA R. “The Eco-Indicator 99 Explained”. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 3(6), pp. 352-360. 1998 Disponível em: www.scientificjournals.com/sj/lca/welcome.htm.

- GOEDKOOP M. AND SPRIENSMA R. “Methodology Annex: The Eco-indicator 99: A damage-oriented method for life cycle impact assessment”. **PRé Consultants**, Amersfoort, The Netherlands. 2001. Disponível em: www.pre.nl/ecoindicator99
- GOEDKOOP M, HEIJUNGS R, HUIJBREGTS MAJ, DE SCHRYVER A, STRUIJS J, AND VAN ZELM R. “ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and endpoint levels”. First edition. Report i: Characterization. **the Netherlands: Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer**. 2009.
- GOEDKOOP M, HEIJUNGS R, HUIJBREGTS M, DE SCHRYVER A, STRUIJS J, VAN ZELM R. “ReCiPE 2008: a life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level”. The Hague: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment. 2013.
- GOES FILHO, H. A. “Dragagem e Gestão dos Sedimentos”. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 162 p., 2004.
- GUINÉE, J., B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. DE; OERS, L. VAN; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H.A.; BRUIJN, H. DE; DUIN, R. VAN; HUIJBREGTS, M.A.J. “Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. Iia: Guide. Iib: Operational annex. III: Scientific background”. **Kluwer Academic Publishers**, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 692 pp. 2002. Disponível em: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-projects/science/cml-new-dutch-lca-guide>
- GULOTTA, T. M., MISTRETTA, M., E PRATICÒ, F. G. “A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads”. **Science of the Total Environment**, 673, 585–593. 2019. Disponível em: DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.04.046
- HAMZAH, M. O., JAMSHIDI, A., SHAHADAN, Z. “Evaluation of the potential of sasobit to reduce required heat energy and co2 emission in the asphalt industry”. **Journal of Cleaner Production**, 18, 1859-1865. 2010. Disponível em: DOI:10.1016/J.JCLEPRO.2010.08.002
- HARVEY, J. T., MEIJER, J., KENDALL, A. TECH BRIEF: life cycle assessment of pavement. FHWA-HIF-15-001. **Federal Highway Administration**, Washington, DC. 2014.
- HARVEY, J.T., MEIJER, J., OZER, H., AL-QADI, I. L., SABOORI, A., KENDALL, A. Pavement life cycle assessment framework. FHWA-HIF-16-014. **Federal Highway Administration**, Washington, DC. 2016.

- HASAN, U., WHYTE, A., JASSMI, H. AL. “Critical review and methodological issues in integrated life-cycle analysis on road networks”. **Journal of Cleaner Production**. v. 206 541 e 558. 2019. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.09.148](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.148)
- HAUSCHILD, Z. M., ROSENBAUM, R. K., OLSEN, S. I. “Life Cycle Assessment: Theory and Practice”. **Springer International Publishing**. 2018. Disponível em: [doi: 10.1007/978-3-319-56475-3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3)
- HELMES, RJK., HUIJBREGTS, MAJ., HENDERSON, AD., JOLLIET, O. “Spatially explicit fate factors of phosphorous emissions to freshwater at the global scale”. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. 17: 646–654. 2012. DOI: [10.1007/s11367-012-0382-2.pdf](https://doi.org/10.1007/s11367-012-0382-2.pdf)
- HERRMANN, I.T., MOLTESEN, A. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? –a comparative assessment of SimaPro and GaBi. **Journal of Cleaner Production**. 86, 163–169. 2015. Disponível em: DOI: [10.1016/j.jclepro.2014.08.004](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.004)
- HOANG, T., JULLIEN, A., VENTURA, A., CROZET, Y. “A global methodology for sustainable road-Application to the environmental assessment of French highway”. In: **10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components**, Lyon (France), April, pp. 17 e 20. 2005.
- HONG, F., E PROZZI, J. A. “Evaluation of recycled asphalt pavement using economic, environmental, and energy metrics based on long-term pavement performance sections”. **Road Materials and Pavement Design**, 19(8), 1816–1831. 2018. Disponível em: [doi:10.1080/14680629.2017.1348306](https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1348306)
- HORVATH, A. “A Life-Cycle Analysis Model and Decision-Support Tool for Selecting Recycled versus Virgin Materials for Highway Applications”. **University of California at Berkeley**. (2004).
- HOSSAIN, M., U., *et al.*, 2016. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, 109, 67–77. Disponível em: [doi:10.1016/j.resconrec.2016.02.009](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.009).
- HUANG, Y.; BIRD, R.; HEIDRICH, O. “Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements”. **Journal of Cleaner Production**. v. 17. p. 283-296. 2009.
- HUANG, Y., HAKIM, B., ZAMMATARO, S. “Measuring the carbon footprint of road construction using CHANGER”. **International Journal of Pavement Engineering**. 14 (6), 590-600. 2013.

- HUANG, M., DONG, Q., NI, F., WANG, L. “LCA and LCCA based multi-objective optimization of pavement maintenance”. **Journal of Cleaner Production**, 283. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124583>
- HUIJBREGTS MAJ, STEINMANN ZJN, ELSHOUT PMF, STAM G, VERONES F, VIEIRA MDM, VAN ZELM R, ReCiPe2016. “A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: characterization”. RIVM Report 2016–0104. 2016. **National Institute for Human Health and the Environment, Bilthoven**.
- HUIJBREGTS, M.A.J., STEINMANN, Z.J.N., ELSHOUT, P.M.F., STAM, G., VERONES, F., VIEIRA, M., ZIJP, M., HOLLANDER, A., VAN ZELM, R. “ReCiPe2016: A Harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level”. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. 22 (2), 138e147. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- HUMBERT, S., DE SCHRYVER, A., BENGUA, X., MARGNI, M., JOLLIET, O. “**IMPACT 2002+: User Guide** Draft for version Q2.21” (version adapted by Quantis). 2012. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.454.741&rep=rep1&type=pdf>
- INYIM, P.; PEREYRA, J.; BIENVENU, M.; MOSTAFAVI, A. “Environmental assessment of pavement infrastructure: A systematic review”. **Journal of environmental management**, v. 176, p. 128-138, 2016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.03.042.
- IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf>
- ISO (International Standardization Organization): **Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework** (ISO14040:2006). Geneva, Suíça. 2006a
- ISO (International Standardization Organization) **Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines** (ISO14044:2006). Geneva, Suíça. 2006b
- JOLLIET, O., MARGNI, M., CHARLES, R. *et al.* “IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology”. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. 8, 324. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02978505>

- JOSHI, S. “Product Environmental Life-Cycle Assessment Using Input-Output Techniques”. **Journal of Industrial Ecology**, 3(2-3), 95–120. 1999. Disponível em: [doi:10.1162/108819899569449](https://doi.org/10.1162/108819899569449).
- JULLIEN, A., DAUVERGNE, M., PROUST, C. “Road LCA: the dedicated ECORCE tool and database”. **International Journal of Life Cycle Assessment**. 20 (5), 655 e 670. 2015. Disponível em: [DOI:10.1007/s11367-015-0858-y](https://doi.org/10.1007/s11367-015-0858-y)
- KIM, Y. R. **Modeling of asphalt concrete**. American Society of Civil Engineers, McGraw-Hill Construction, 1ª Ed. 2009.
- LENZEN, M. “Errors in conventional and input-output-based life-cycle inventories”. **Journal of Industrial Ecology**. 4, 127-148. 2000. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1162/10881980052541981>.
- LENZEN, M., CRAWFORD, R.H. “The path exchange method for hybrid LCA”. **Environ. Sci. Technol.** 43, 8251e8256. 2009.
- LI, J., XIAO, F., ZHANG, L., AMIRKHANIAN, S., N. “Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review”. **Journal of Cleaner Production**. v. 233, p. 1182–1206. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>
- LIU, R., SMARTZ, B.W., DESCHENEAUX, B. “LCCA and environmental LCA for highway pavement selection in Colorado”. **International Journal of Sustainable Engineering** 8 (2) 102 e 110. 2015. Disponível em: DOI:10.1080/19397038.2014.958602
- LIU, X., CUI, Q., & SCHWARTZ, C. W. “Introduction of mechanistic-empirical pavement design into pavement carbon footprint analysis”. **International Journal of Pavement Engineering**. 2018. Disponível em: DOI:10.1080/10298436.2016.1205748
- LU, X., ISACSSON, U. “Modification of road bitumens with thermoplastic polymers”. **Polymer Testing**. 20 (1) 77 e 86. 2000. Disponível em: DOI: 10.1016/S0142-9418(00)00004-0
- MARTINEZ-ARGUELLES, G., ACOSTA, M.P., *et al.* “Life cycle assessment of natural and recycled concrete aggregate production for road pavements applications in the Northern region of Colombia: case study”. **Transportation Research Record**, 2673 (5), 1–16. 2019. Disponível em: DOI:10.1177/0361198119839955.
- MAURO, R., GUERRIERI, M. “Comparative life-cycle assessment of conventional (double lane) and non-conventional (turbo and flower) roundabout intersections”. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**. 48, 96e111. 2016. Disponível em: DOI: 10.1016/j.trd.2016.08.011

- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3° edição, Editora. Interciência, Rio de Janeiro, 2015.
- MELLO, J. C. "Planejamento dos transportes". São Paulo: McGraw-Hill do Brasil. 1975.
- MENG, Y., ZHANG, C., LIU, Z., LING, L., LEI, J., FANG, G., LUO, X. "Recycling of waste printed circuit boards: Effect of PCB on aging resistance property of SBR modified asphalt". **Journal of Building Engineering**. 72. 2023. Disponível em: DOI: 10.1016/j.job.2023.106617
- MONISMITH, C. L.; FINN, F. N.; VALLERGA, B. A. A comprehensive asphalt concrete mixture design system. In: GARTNER, W. **Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches**. [S.l.]: American Society for Testing and Materials - ASTM, 1989. Cap. 3, p. 136.
- MOTTA, L. M. G.; PINTO, S. **O uso de ensaios estáticos na definição de parâmetros de comportamento das misturas asfálticas**. 12° Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro do Petróleo. Rio de Janeiro, 1994
- MORETTI, L., MANDRONE, V., ANDREA, A.D., CARO, S. "Comparative "from Cradle to Gate" Life Cycle Assessments of Hot Mix Asphalt (HMA) Materials". **Sustainability** (Switzerland). 2017. Disponível em: doi: 10.3390/su9030400
- MUENCH, S. Roadway construction sustainability impacts: review of life-cycle assessments. **Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board** 2151 (1), 36-45. 2010.
- MUENCH, S.T., LIN, Y.Y., KATARA, S., ARMSTRONG, A. "Roadprint: Practical Pavement Life Cycle Assessment (LCA) Using Generally Available Data". **International Symposium on Pavement LCA**, pp. 14-16. 2014.
- MUKHERJEE, A., CASS, D. "Project emissions estimator: implementation of a project-based framework for monitoring the greenhouse gas emissions of pavement". **Transportation Research Record**. 2282 (1), 91 e 99. 2012.
- MUKHERJEE, A., STAWOWY, B., CASS, D. "Project emission estimator: tool for contractors and agencies for assessing greenhouse gas emissions of highway construction projects". **Transportation Research Record**. 2366 (1), 3 e 12. 2013.
- NASCIMENTO, F., GOUVEIA, B. G., DIAS, F., RIBEIRO, F., SILVA, M., A. (2020). "A method to select a road pavement structure with life cycle assessment". **Journal of Cleaner Production**. Disponível em: [doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122210](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122210).

- NASCIMENTO, F. A. C. **Alguns aspectos operacionais e ambientais incorporados a um sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários: uma contribuição metodológica à luz da análise do ciclo de vida**. Tese (Doutorado em Engenharia Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2021.
- NICUȚĂ, A., M. “Life Cycle Assessment Study for New and Recycled Asphalt Pavements”. **Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi - Construction**. 2011. Disponível em: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=vi&user=fa_WRjAAAAAJ&citation_for_view=fa_WRjAAAAAJ:5nxA0vEk-isC
- OSORTO, M. R. R.; CASAGRANDE, M. D. T. Environmental Impact Comparison Analysis between a Traditional Hot Mixed Asphalt (HMA) and with the Addition of Recycled Post-Consumer Polyethylene Terephthalate (RPET) through the Life Cycle Assessment (LCA) Methodology. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1102, 2023. DOI: 10.3390/su15021102.
- ORTIZ, O., CASTELLS, F., SONNEMANN, G. “Sustainability in the construction industry: a review of recent developments based on LCA”. **Constr. Build. Mater.** 23 (1), 28 - 39. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>
- PASETTO, M., BALIELLO, A., GIACOMELLO, G., PASQUINI, E. “Sustainable solutions for road pavements: a multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags”. **Journal of Cleaner Production**, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.212>. URL.
- PLATI, C. “Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review”. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 539–555. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.242>
- RIDOUTT, B.G., PFISTER, S., MANZARDO, A., BARE, J., BOULAY, A.-M., CHERUBINI, F., FANTKE, P., FRISCHKNECHT, R., HAUSCHILD, M., HENDERSON, A., JOLLIET, O., LEVASSEUR, A., MARGNI, M., MCKONE, T., MICHELSEN, O., I CANALS, L., PAGE, G., PANT, R., RAUGEI, M., SALA, S., VERONES, F. “Area of concern: a new paradigm in life cycle assessment for the development of footprint metrics”. **International Journal of Life Cycle Assess.** 21, 276–280. 2015. Disponível em: [doi:10.1007/s11367-015-1011-7](https://doi.org/10.1007/s11367-015-1011-7)
- ROSADO, L.P., *et al.* “Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil”. **Journal of Cleaner Production**, 151, 634–642. 2017. Disponível em: [doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.068](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.068).

- ROY, P-O, AZEVEDO L., B., MARGNI, M., VAN ZELM, R., DESCHÊNES, L., HUIJBREGTS, M., A., J. “Characterization factors for terrestrial acidification at the global scale: a systematic analysis of spatial variability and uncertainty”. **Science of the Total Environment**. v. 500, p 270–276. 2014. Disponível em: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.099
- SANTOS, J., FERREIRA, A., FLINTSCH, G. “A life cycle assessment model for pavement management: methodology and computational framework”. **International Journal of Pavement Engineering**. 16 (3), 268-286. 2015a. Disponível em: [DOI:10.1080/10298436.2014.942861](https://doi.org/10.1080/10298436.2014.942861)
- SANTOS, J., BRYCE, J., FLINTSCH, G., FERREIRA, A., DIFENDERFER, B. “A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices”. **Structure and Infrastructure Engineering**. 11 (9), 1199 e 1217. 2015b. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15732479.2014.945095>.
- SANTOS, J., M., O., DOS, THYAGARAJAN, S., KEIJZER, E., FLORES R. F., FLINTSCH, G. “Comparison of Life-Cycle Assessment Tools for Road Pavement Infrastructure”. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 2646, pp. 28–38. 2017a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3141/2646-04>
- SANTOS, J., FLINTSCH, G., FERREIRA, A. “Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability”. **Resources, Conservation and Recycling**, 116, 15–31. 2017b. Disponível em: [doi:10.1016/j.resconrec.2016.08.025](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.08.025)
- SANTOS, J., BRESSI, S., CEREZO, V., LOPRESTI, D., DAUVERGNE, M. “Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis”. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 138, 283-297, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.012>
- SANTOS, J., BRESSI, S., CEREZO, V., LOPRESTI, D. “SUP&R DSS: A sustainability-based decision support system for road pavements”. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, 424-540, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.308>
- SHI, X., *et al.*, “Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate”. **Journal of Cleaner Production**, 225, 414–425. 2019. Disponível em: [doi:10.1016/j.jclepro.2019.03.288](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.288).
- STEK, E., DELONG, D., MCDONNELL, T., RODRIGUEZ, J. “Life cycle assessment using ATHENA impact estimator for buildings: a case study”. In: Reston, VA: ASCE **Copyright Proceedings of the 2011 Structures Congress**, Las Vegas, Nevada. American Society of Civil Engineers. 2011

- STENICO, R., CAMPOS, D., TADEU, A., E CAMPOS, F. DE. “Assessing the impacts of road freight transport on sustainability: A case study in the sugar-energy sector”. **Journal of Cleaner Production**, 2019. 220, 995–1004. Disponível em: [doi:10.1016/j.jclepro.2019.02.171](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.171)
- STRIPPLE, H. Life Cycle Assessment of Road: A Pilot Study for Inventory Analysis. Gothenburg: IVL, 2001.
- SUH, S., & HUPPES, G. “Methods for Life Cycle Inventory of a product”. **Journal of Cleaner Production**, 13(7), 687–697. 2005. Disponível em: [doi:10.1016/j.jclepro.2003.04.001](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.04.001)
- THIVES, L. P.; GHISI, E. “Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 473-484, 2017. DOI: [10.1016/j.rser.2017.01.087](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.087).
- TRELOAR, G. J. “Extracting Embodied Energy Paths from Input–Output Tables: Towards an Input–Output-based Hybrid Energy Analysis Method”. **Economic Systems Research**, 9(4), 375–391. 1997. Disponível em: [doi:10.1080/09535319700000032](https://doi.org/10.1080/09535319700000032)
- VAN CANEGHEM, J., BLOCK, C., VANDECASTEELE, C. “Assessment of the impact on human health of industrial emissions to air: Does the result depend on the applied method?”. **Journal of Hazardous Materials**, 184, pp 788-797. 2010
- VAN DAM, T. J., J. T. HARVEY, S. T. MUENCH, K. D. SMITH, M. B. SNYDER, I. L. AL-QADI, H. OZER, J. MEIJER, P. V. RAM, J. R. ROESLER, AND A. KENDALL. “Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document”. FHWA-HIF-15-002. Federal Highway Administration, Washington, DC. 2015
- VAN ZELM R; PREISS P; VAN GOETHEM T; VAN DINGENEN R; HUIJBREGTS M. “Regionalized life cycle impact assessment of air pollution on the global scale: damage to human health and vegetation”. **Atmospheric Environment** 134. p. 129-137. 2016
- VALDIVIA, S., UGAYA, C.M., HILDENBRAND, J., TRAVERSO, M., MAZIJN, B., SONNEMANN, G. “A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment our contribution to Rio+20”. **International Journal of Life Cycle Assessment**. 18, 1673 e 1685. 2013. Disponível em: [10.1007/s11367-012-0529-1](https://doi.org/10.1007/s11367-012-0529-1).
- VEGA ARAUJO, D., L., SANTOS, J., MARTINEZ-ARGUELLES G. “Life cycle assessment of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for road pavements construction”. **International Journal of Pavement Engineering**. 2020. Disponível em: [DOI:10.1080/10298436.2020.1778694](https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1778694)

- WATSON, J. G.; CHOW, J. C.; FUJITA, E. M. “Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance”. **Atmospheric Environment**, v. 35, n. 9, p. 1567-1584. 2001.
- WANG, H., AL-SAADY, I., LU, P., JASIM, A. “Quantifying greenhouse gas emission of asphalt pavement preservation at construction and use stages using life-cycle assessment”. **International Journal of Sustainable Transportation**. 14:1, 25-34. 2020. Disponível em: DOI: 10.1080/15568318.2018.1519086
- WANG, F., HOFF, I., YANG, F., WU, S., XIE, J., LI, N., ZHANG, L. “Comparative assessments for environmental impacts from three advanced asphalt pavement construction cases”. **Journal of Cleaner Production**, 297. 2021. Disponível em: doi:10.1016/j.jclepro.2021.126659
- WMO: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 55. Geneva, Switzerland. 2014.
- YU, B., LU, Q.,. “Life cycle assessment of pavement: methodology and case study”. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**. 17 (5), 380e388. 2012. Disponível em: DOI:10.1016/j.trd.2012.03.004
- YU, B., LU, Q., XU, J. “An improved pavement maintenance optimization methodology: integrating LCA and LCCA”. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**. 55, 1 e11. 2013. Disponível em: DOI: 10.1016/j.tra.2013.07.004
- YU, B., LU, Q. “Estimation of albedo effect in pavement life cycle assessment”. **Journal of Cleaner Production**. 64, 306e309. 2014. Disponível em: DOI:10.1016/j.jclepro.2013.07.034
- ZHENG, X.; EASA, S. M.; YANG, Z.; JI, T. “Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study”. **Journal of Cleaner Production**, 18, 659-672. 2019. Disponível em: doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.227
- ZHU, J.; BIRGISSON, B.; KRINGOS, N. “Polymer modification of bitumen: Advances and Challenges”. **European Polymer Journal**, 54: 18-38. 2014. Disponível em: DOI:10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005

APÊNDICE A

No APÊNDICE A, serão apresentados os resultados dos dimensionamentos, assim como todos os demais cálculos necessários para a realização dessa tese.

A.1 Dimensionamento dos pavimentos

Considerando-se os materiais apresentados no anexo I dessa tese, um período de projeto de 10 anos e os volumes médios diários anuais (VMDA) de 1350 e 2700 veículos, com uma taxa de crescimento de tráfego nula. Dimensionou-se os pavimentos de acordo com os critérios do MeDiNa, que consideram limites de área trincada (AT) e afundamento de trilha de roda (ATR) no período de vida útil. A Tabela A.1 apresenta os valores de AT e ATR esperadas para os diferentes pavimentos propostos, além de expor as espessuras adotadas para construção dos revestimentos dos pavimentos considerado aproximações de múltiplos de 5 cm.

Tabela A.1 – Espessura dos revestimentos dos pavimentos.

VMDA	CAP 30/45			CAP 50/70			CAP SBS			CAPFLEX		
	AT (%)	ATR (mm)	e (cm)	AT (%)	ATR (mm)	e (cm)	AT (%)	ATR (mm)	e (cm)	AT (%)	ATR (mm)	e (cm)
1350	28,2	9,6	7,0	29,3	7,1	10,0	27,5	9,8	11,0	16,5	9,5	11,5
2700	29,0	4,5	12,0	29,1	4,1	15,0	29,8	5,9	17,0	29,5	8,4	13,5

A.2 Determinação da energia gasta na usinagem das misturas

A determinação da energia gasta em kJ por tonelada de misturas usinada é feita segundo a equação A.1. Dentre as considerações adotadas para sua elaboração estão: usina asfáltica gravimétrica com queima de óleo combustível para secagem e aquecimento dos agregados (SANTOS *et al.*, 2018; VEGA *et al.* 2020). Os parâmetros de usinagem das misturas foram obtidos dos trabalhos de FLÔRA, 2018 e CCR, 2010. As quantidades de energia requeridas por tonelada de mistura asfáltica calculados para cada tipo de mistura asfáltica são apresentadas nas Tabelas A.2, A.3, A.4 e A5.

$$\begin{aligned} TE = & [\text{MAV} \times \text{CEAV} \times (\text{TUM} - \text{T0}) + \text{MA} \times \text{CA} \times (\text{TUM} - \text{T0}) \\ & + \text{MAV} \times \text{WAV} \times \text{CW} \times (\text{100} - \text{T0}) \\ & + \text{Lv} \times \text{MAV} \times \text{WAV} \\ & + \text{MAV} \times \text{WAV} \times \text{Cvap} \times (\text{TUM} - \text{100})] \\ & \times [\text{1} + \text{PE}] \end{aligned} \quad \text{(Equação A.1)}$$

Em que,

TE: Energia de usinagem (kJ/t);
 MAV: massa de agregado virgem (kg);
 CEAV: calor específico do agregado virgem (kJ/kg/°C);
 TUM: temperatura de usinagem da mistura asfáltica (°C);
 T0: temperatura ambiente (°C);
 MA: massa de asfalto (kg);
 CA: calor específico do asfalto (kJ/kg/°C);
 WAV: teor de umidade do agregado virgem (%);
 CW: calor específico da água a 15°C (kJ/kg/°C);
 Lv: calor específico de vaporização da água (kJ/kg);
 Cvap: calor específico do vapor de água (kJ/kg/°C);
 PE: Perda da energia (%).

Tabela A.2 – Propriedades térmicas do revestimento com CAP30/45.

Variável	Quantidade	Unidade
T0 - Temperatura ambiente	15	°C
TUM - Temperatura de Usinagem da Mistura	163	°C
CEAV - Calor Específico do Agregado Virgem	0,74	kJ/kg/°C
WAV - Teor de Umidade do Agregado Virgem	3	% por massa de agregado
CW - Calor específico da água a 15°C	4,1855	kJ/kg/°C
Lv - Calor latente de vaporização da água	2256	kJ/Kg
Cvap - Calor específico do vapor de água	1,83	kJ/Kg
CA - Calor específico do Asfalto	2,093	kJ/kg/°C
PE – Perdas Energéticas	27	%
MAV - Massa de Agregado Virgem	954	kg
MA - Massa de Asfalto	46	kg
TE - Energia para usinagem	249910,104	kJ/t
TE - Energia para usinagem	249,910	MJ/t

Tabela A.3– Propriedades térmicas do revestimento com CAP50/70.

Variável	Quantidade	Unidade
t0 - Temperatura ambiente	15	°C
TUM - Temperatura de Usinagem da Mistura	151	°C
CEAV - Calor Específico do Agregado Virgem	0,74	kJ/kg/°C
WAV - Teor de Umidade do Agregado Virgem	3	% por massa de agregado
CW - Calor específico da água a 15°C	4,1855	kJ/kg/°C
Lv - Calor latente de vaporização da água	2256	kJ/kg
Cvap - Calor específico do vapor de água	1,83	kJ/kg
CA - Calor específico do Asfalto	2,093	kJ/kg/°C
PE – Perdas Energéticas	27	%

MAV - Massa de Agregado Virgem	955	kg
MA - Massa de Asfalto	45	kg
TE - Energia para usinagem	236755,182	kJ/t
TE - Energia para usinagem	236,755	MJ/t

Tabela A.4 – Propriedades térmicas do revestimento com CAP modificado por polímero (CAP SBS)

Variável	Quantidade	Unidade
t0 - Temperatura ambiente	15	°C
TUM - Temperatura de Usinagem da Mistura	162	°C
CEAV - Calor Específico do Agregado Virgem	0,74	kJ/kg/°C
WAV - Teor de Umidade do Agregado Virgem	3	% por massa de agregado
CW - Calor específico da água a 15°C	4,1855	kJ/kg/°C
Lv - Calor latente de vaporização da água	2256	kJ/kg
Cvap - Calor específico do vapor de água	1,83	kJ/kg
CA - Calor específico do Asfalto	2,093	kJ/kg/°C
PE – Perdas Energéticas	27	%
MAV - Massa de Agregado Virgem	948	kg
MA - Massa de Asfalto	52	kg
TE - Energia para usinagem	249717,309	kJ/t
TE - Energia para usinagem	249,717	MJ/t

Tabela A.5 – Propriedades térmicas do revestimento com CAP modificado por borracha (CAPFLEX).

V Variável	Quantidade	Unidade
t0 - Temperatura ambiente	15	°C
TUM - Temperatura de Usinagem da Mistura	175	°C
CEAV - Calor Específico do Agregado Virgem	0,74	kJ/kg/°C
WAV - Teor de Umidade do Agregado Virgem	3	% por massa de agregado
CW - Calor específico da água a 15°C	4,1855	kJ/kg/°C
Lv - Calor latente de vaporização da água	2256	kJ/kg
Cvap - Calor específico do vapor de água	1,83	kJ/kg
CA - Calor específico do Asfalto	2,093	kJ/Kg/°C
PE – Perdas Energéticas	27	%
MAV - Massa de Agregado Virgem	941	kg
MA - Massa de Asfalto	59	kg
TE - Energia para usinagem	265146,897	kJ/t
TE - Energia para usinagem	265,147	MJ/t

A.3 Quantitativos de materiais para construção dos pavimentos

Assumindo-se a construção de um trecho com um quilometro de extensão, largura de pista de 7,20 metros sem acostamentos de ambos os lados, calou-se as quantidades de materiais e serviços necessários para os pavimentos dimensionados. Para as camadas de revestimento, foram adotadas as espessuras expostas na tabela A.1 desse apêndice e as propriedades volumétricas das misturas foram retiradas das tabelas I, II III e IV do anexo desse trabalho. Foram consideradas espessuras de 15 cm para base e sub-base, além de serviço de imprimação. Nas Tabelas A.6 e A.7 apresenta-se as quantidades necessárias de cada material para compor as respectivas camadas dos pavimentos e realizar o serviço de imprimação.

Tabela A.6 – Quantidade de materiais para construção de 1 km dos pavimentos dimensionados para um VMD de 1350.

Cenários	CAP	e (cm)	Revestimento (t)	Imprimação (m ²)	Base (m ³)	Sub-base (m ³)
Cenário 1	CAP 30/45	7,0	1320,480	7200,00	1080,00	1080,00
Cenário 2	CAP 50/70	10,0	1806,480	7200,00	1080,00	1080,00
Cenário 3	CAP SBS	11,0	1948,320	7200,00	1080,00	1080,00
Cenário 4	CAPFLEX	11,5	2026,116	7200,00	1080,00	1080,00

Tabela A.7 – Quantidade de materiais para construção de 1 km dos pavimentos dimensionados para um VMD de 2700.

Cenários	CAP	e (cm)	Revestimento (t)	Imprimação (m ²)	Base (m ³)	Sub-base (m ³)
Cenário 5	CAP 30/45	12,0	2263,680	7200,00	1080,00	1080,00
Cenário 6	CAP 50/70	15,0	2709,720	7200,00	1080,00	1080,00
Cenário 7	CAP SBS	17,0	3011,040	7200,00	1080,00	1080,00
Cenário 8	CAPFLEX	13,5	2378,484	7200,00	1080,00	1080,00

A.4 Quantidade de insumos segundo SICRO (2023)

O SICRO, como explicado anteriormente, apresenta procedimentos metodológicos e critérios para o calcular custos unitários de insumos e serviços necessários à execução das obras de construção, restauração, sinalização e de conservação rodoviária pautados em critérios técnicos de racionalidade, eficiência e economicidade. Portanto, tomou-se como parâmetros quantitativos os materiais apresentados nas composições de custos do SICRO.

Para tornar mais ágil a determinação das quantidades de insumos, serviços e processos necessários para a construção de cada cenário utilizou-se o *software* “90 Compor” por meio de uma licença paga e tais quantidades são expostas nas tabelas A.8 a A.18.

Tabela A.8 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 1.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 30/45.	1.346,890	t
	M0005	Brita 0	126,177	t
	M0191	Brita 1	126,177	t
1.1 Extração e fabricação de insumos	M1103	Pedrisco	277,580	t
	M0028	Areia média	656,110	t
	M0344	Cal hidratada – a granel	75,695	t
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	85,164	t
	E9579	Transporte de material britado - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	12.612,429	tkm
1.2 Transporte para usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	6.561,100	tkm
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	5.961,480	tkm
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	13,523	h
1.3 Usina de asfalto	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kw	13,523	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	13,523	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	10,818	h
	M1941	Óleo tipo A1	336.601,420	MJ
1.4 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	13.468,9	tkm

1.5 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	9,413	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	10,871	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	13,258	h

Tabela A.9 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 2.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	1.844.650	t
1.1 Extração e fabricação de insumos	M0005	Brita 0	172,807	t
	M0191	Brita 1	172,807	t
	M1103	Pedrisco	380,164	t
	M0028	Areia média	898,584	t
	M0344	Cal hidratada – a granel	103,669	t
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	116,637	t
1.2 Transporte para usina de asfalto	E9579	Transporte de material britado - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	17.273,516	tkm
	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	13.463,860	tkm
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	12.233,340	tkm
1.3 Usina de asfalto	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	18,157	h
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kw	18,157	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	18,157	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	14,889	h
	M1941	Óleo tipo A1	436.730,450	MJ
1.4 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	18.446,500	tkm
1.5 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	12,892	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	14,889	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	18,157	h

Tabela A.10 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 3.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	1.987,286	t
	M0005	Brita 0	93,522	t
	M0191	Brita 1	140,283	t
1.1 Extração e fabricação de insumos	M1103	Pedrisco	374,087	t
	M0028	Areia média	1.122,241	t
	M0344	Cal hidratada – a granel	140,263	t
	M1945	Cimento asfáltico de petróleo com polímero - CAP 55/75-E	116,892	t
1.2 Transporte para usina de asfalto	E9579	Transporte de material britado - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	14.467,829	tkm
	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	11.222,410	tkm
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	8.182,440	tkm
1.3 Usina de asfalto	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	19,953	h
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kw	19,953	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	19,953	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	15,763	h
	M1941	Óleo tipo A1	491.259,710	MJ
1.4 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	19.872,86	tkm
1.5 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	13,889	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	16,040	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	19,561	h

Tabela A.11 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 4.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	2.066,638	t
	M0005	Brita 0	194,533	t
	M0191	Brita 1	194,533	t
1.1 Extração e fabricação de insumos	M1103	Pedrisco	427,918	t
	M1135	Pó de pedra	1.011,433	t
	M0344	Cal hidratada – a granel	116,703	t
	M1945	Cimento asfáltico de petróleo com polímero - CAP 55/75-E	121,560	t
1.2 Transporte para usina de asfalto	E9579	Transporte de material britado - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	43.516,327	tkm
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kw	8.509,200	tkm
1.3 Usina de asfalto	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kw	24,411	h
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 kva - potência 365 kw	24,411	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	24,411	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	16,600	h
	M1941	Óleo tipo A1	547.962,650	MJ
1.4 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	20,666,38	tkm
1.5 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	14,359	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	16,513	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	23,932	h

Tabela A.12 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 5.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011471	Concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial	2.308,954	t
	M0005	Brita 0	216,303	t
	M0191	Brita 1	216,303	t
1.1 Extração e fabricação de insumos	M1103	Pedrisco	475,852	t
	M0028	Areia média	1.124,761	t
	M0344	Cal hidratada – a granel	129,763	t
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	145,995	t
	E9579	Transporte de material britado - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	21.621,300	tkm
1.2 Transporte para usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	11.247,61	tkm
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	10.219,65	tkm
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	23,182	h
1.3 Usina de asfalto	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kw	23,182	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	23,182	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	18,546	h
	M1941	Óleo tipo A1	577.030,930	MJ
1.4 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	23.089,54	tkm
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	16,137	h
1.5 Construção do Pavimento	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	18,637	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	22,728	h

Tabela A.13 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 6.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	2.763,914	t
	M0005	Brita 0	258,924	t
	M0191	Brita 1	258,924	t
1.1 Extração e fabricação de insumos	M1103	Pedrisco	569,615	t
	M0028	Areia média	1.346,386	t
	M0344	Cal hidratada – a granel	155,332	t
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	174,762	t
	E9579	Transporte de material britado - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	25.881,619	tkm
1.2 Transporte para usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	13.463,860	tkm
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	12.233,340	tkm
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kw	27,750	h
1.3 Usina de asfalto	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kw	27,750	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	27,750	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	22,200	h
	M1941	Óleo tipo A1	654.370,960	MJ
1.4 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	27.639,140	tkm
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	19,316	h
1.5 Construção do Pavimento	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	22,309	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	27,206	h

Tabela A.14 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 7.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	3.071,261	t
	M0005	Brita 0	144,534	t
	M0191	Brita 1	216,800	t
1.1 Extração e fabricação de insumos	M1103	Pedrisco	578,134	t
	M0028	Areia média	1.734,372	t
	M0344	Cal hidratada – a granel	216,770	t
	M1945	Cimento asfáltico de petróleo com polímero - CAP 55/75-E	180,652	t
1.2 Transporte para usina de asfalto	E9579	Transporte de material britado - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	22.359,338	tkm
	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	17.343,720	tkm
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	15.173,900	tkm
1.3 Usina de asfalto	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kw	30,836	h
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kw	30,836	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	30,836	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	24,360	h
	M1941	Óleo tipo A1	766.947,030	MJ
1.4 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	30.712,610	tkm
1.5 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	21,464	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	24,790	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	30,231	h

Tabela A.15 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 8.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011471	Concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial	2.426,054	t
	M0005	Brita 0	228,364	t
	M0191	Brita 1	228,364	t
1.1 Extração e fabricação de insumos	M1103	Pedrisco	502,339	t
	M1135	Pó de pedra	1.187,335	t
	M0344	Cal hidratada – a granel	136,999	t
	M1945	Cimento asfáltico de petróleo com polímero - CAP 55/75-E	142,700	t
1.2 Transporte para usina de asfalto	E9579	Transporte de material britado - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	51.084,368	tkm
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	9.989,000	tkm
1.3 Usina de asfalto	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kw	28,656	h
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kw	28,656	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	28,656	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	19,486	h
	M1941	Óleo tipo A1	643.260,690	MJ
1.4 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	24.260,540	tkm
1.5 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	16,857	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	19,385	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	16,857	h

Tabela A.16 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação e execução do serviço de imprimação – Todos os cenários.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
2. Imprimação	4011351	Imprimação com emulsão asfáltica	7.200,00	m²
2.1 Extração e fabricação de insumos	M0104	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (betume)	4,32	t
	M0104	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (querosene)	4,32	t
2.2 Transporte para a obra	-	O SICRO não quantifica o transporte do asfalto diluído (Usina até o local da construção)	432	tkm
2.3 Execução do serviço	E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	12,80	h
	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	6,40	h

Tabela A.17 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de base – Todos os cenários.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
3. Base	4011549	Base ou sub-base de brita graduada executada com vibroacabadora - brita comercial	1.080,00	m³
3.1 Extração e fabricação de insumos	M0005	Brita 0	859,831	t
	M0191	Brita 1	238,140	t
	M0192	Brita 2	422,172	t
	M1135	Pó de pedra	855,835	t
3.2 Transporte para a usina de solos	-	O SICRO não quantifica o transporte do material granular do local onde ele é desmontado e britado para a usina de solos	-	tkm
3.2 Fabricação	E9615	Usina misturadora de solos com capacidade de 300 t/h - 44 kw	9,542	h
	E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,40 m ³ - 195 kw	10,878	h
3.3 Transporte para a obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	59.400,00	tkm
3.5 Construção da Camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kw	10,878	h
	E9779	Grupo gerador - capacidade 113 KVA - Potência 84 kw	9,542	h
	E9530	Rolo compactador liso auto propelido vibratório de 11 t - 97 kw	4,962	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kw	9,542	h
	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kw	3,244	h

Tabela A.18 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de sub-base – Todos os cenários.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
4. Sub-base	4011227	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida.	1.080,00	m³
4.1 Extração e fabricação de insumos	E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kW	5,161	h
4.2 Transporte de material na obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	3341,25	tkm
4.3 Construção da camada	E9524	motoniveladora - 93 kW	4,767	h
	E9762	rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	4,623	h
	E9685	rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	4,816	h
	E9577	trator agrícola sobre pneus - 77 kW	3,323	h
	E9571	caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	5,971	h

A.5 Banco de dados para alimentar o *software* SimaPro

Cada cenário requer que um conjunto de atividades, que demandam recursos materiais e energéticos, sejam realizadas para sua construção. A determinação dos impactos ambientais dessa cadeia é feita por meio do processamento das substâncias e energias consumidas e emitidas (*inputs e outputs*) por meio de métodos de análise de impacto de ciclo de vida. Para tanto, a base de dados utilizadas devem ter as taxas de consumos, produtividade e emissões de cada processo associadas.

Ressalta-se então, que os tipos e quantitativos dos serviços e processos necessários à construção dos cenários foram pautados no SICRO e a base de dados adotada para realização da AICV foi a *Ecoinvent*®. Além disso, o *software* SimaPro foi usado para integração entre a base de dados e o método de AICV ReCiPe (H) versão 1.07.

Tabela A.19 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 1.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 30/45.	-	1.346,890	t
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	126.177,000	kg
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	126.177,000	kg
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	277.580,000	kg
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	75.695,000	kg
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	656.110,000	kg
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	85.164,000	kg
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	6.561,100	tkm
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	5.961,480	tkm
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	336.601,420	MJ
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	13,523	MJ
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	13,523	h

	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	10,818	h
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	13.468,900	tkm
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	9,413	h
1.6 Construção da camada	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	10,871	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	13,258	h

Tabela A.20 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 2.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	-	1.844,650	t
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	172.807,000	kg
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	172,807,000	kg
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	380.164,000	kg
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	130.669,000	kg
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	898.584,000	kg
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	174.762,000	kg
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	8.985,840	tkm

	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	8.164,590	tkm
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	436.730,4500	MJ
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	1.877,824	MJ
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	18,521	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	14,889	h
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	18.446,500	tkm
1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	12,892	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	14,889	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	18,157	h

Tabela A.21 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 3.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	-	1.987,286	t

1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	93.522,000	kg
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	140.283,000	kg
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	374.087,000	kg
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	140.263,000	kg
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	1.122.241,000	kg
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	116.892,000	kg
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	11.222,410	tkm
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	8.182,440	tkm
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	496.259,700	MJ
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2.023,013	MJ
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	19,953	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	15,763	h
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	19.872,860	tkm

1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	13,889	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	16,040	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	19,561	h

Tabela A.22 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 4.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011471	Concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial	-	2.066,638	t
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	194.533,000	kg
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	194.533,000	kg
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	427.918,000	kg
	M0028	Pó de pedra	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.011.433,000	kg
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	116.703,000	kg
1.2 Extração e fabricação de insumos	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	121.560,000	kg
1.3 Transporte para a usina de asfalto	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	8.509,000	tkm
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	547.962,652	MJ

	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2.475,004	MJ
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	24,411	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	16,600	h
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	20.666,380	tkm
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	14,359	h
1.6 Construção da camada	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	16,513	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	23,932	h

Tabela A.23 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 5.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 30/45.	-	2.308,954	t
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	216.303,000	kg
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	216.303,000	kg
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	475.852,000	kg
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	129.763,000	kg

1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	1.124.761,000	kg
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	145.995,000	kg
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	11.247,600	tkm
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	10.219,700	tkm
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	577.031,000	MJ
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2.350,400	MJ
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	23,182	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	18,546	h
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	23.089,500	tkm
1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	16,137	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	18,637	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	22,728	h

Tabela A.24 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 6.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	-	2.763,914	t
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	258.924,000	kg
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	258.924,000	kg
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	569.615,000	kg
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	155.332,000	kg
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	1.346.386,000	kg
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	174.762,000	kg
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	13.463,900	tkm
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	12.233,300	tkm
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	654.370,960	MJ
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2.813,542	MJ
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	27,750	h

	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	22,200	h
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	27.639,140	tkm
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	19,316	h
1.6 Construção da camada	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	22,309	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	27,206	h

Tabela A.25 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 7.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	-	3.071,261	t
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	144.534,000	kg
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	216.800,000	kg
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	578.134,000	kg
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	180.652,000	kg
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	1.734.372,000	kg
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	216.770,000	kg
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	17.343,700	tkm

		capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW			
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	15.173,900	tkm
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	766.947,000	MJ
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	3.126,430	MJ
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	30,836	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	24,360	h
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	30.712,61	tkm
1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	21,464	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	24,790	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	30,231	h

Tabela A.26 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 8.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011471	Concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial	-	2.426,054	t

1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	228.364,000	kg
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	228.364,000	kg
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	502.339,000	kg
	M0028	Pó de pedra	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.187.335,000	kg
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	136.999,000	kg
1.2 Extração e fabricação de insumos	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	142.700,000	kg
1.3 Transporte para a usina de asfalto	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	9.989,000	tkm
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	643.260,690	MJ
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2.905,400	MJ
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	28,656	h
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	19,486	h
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	24.260,540	tkm
1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	16,857	h

E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	19,385	h
E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	28,095	h

Tabela A.27 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação e execução do serviço de imprimação – SimaPro – Todos os cenários.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
2. Imprimação	4011351	Imprimação com emulsão asfáltica	-	7.200,00	m²
2.1 Extração e fabricação de insumos	M0104	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (betume)	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	4.320,000	kg
	M0104	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (querosene)	Kerosene {BR} market for kerosene APOS, U	4.320,000	kg
2.2 Transporte para a obra	-	O SICRO não quantifica o transporte do asfalto diluído (Usina até o local da construção)	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	432	tkm
2.3 Execução do serviço	E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	12,80	h
	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	6,40	h

Tabela A.28 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de base – SimaPro – Todos os cenários.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
3. Base	4011549	Base ou sub-base de brita graduada executada com vibroacabadora - brita comercial	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.080,00	m³
	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	859.831,000	kg
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	238.140,000	kg
3.1 Extração, fabricação de insumos e transporte para usina de solos	M0192	Brita 2	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	422.172,000	kg
	M1135	Pó de pedra	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	855.835,000	kg
3.2 Fabricação na usina de solos	E9615	Usina misturadora de solos com capacidade de 300 t/h - 44 kw	Machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	9,542	h
	E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,40 m³ - 195 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	10,878	h
3.3 Transporte para a obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	59.400,00	tkm

3.5 Construção da Camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	10,878	h
	E9779	Grupo gerador - capacidade 113 KVA - Potência 84 kw	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	222,646	MJ
	E9530	Rolo compactador liso auto propelido vibratório de 11 t - 97 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	4,962	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	9,542	h
	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3,244	h

Tabela A.29 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de sub-base – SimaPro – Todos os cenários.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
4. Sub-base	4011227	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida.		1.080,00	m³
4.1 Extração e fabricação de insumos	E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	5,161	h
4.2 Transporte de material na obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	3.341,25	tkm

4.3 Construção da camada	E9524	motoniveladora - 93 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	4,767	h
	E9762	rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	4,623	h
	E9685	rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	4,816	h
	E9577	trator agrícola sobre pneus - 77 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3,323	h
	E9571	caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	5,971	h

A.6 Contribuições para mudanças climáticas

Para cada cenário foi estimada a possível contribuição para as mudanças climáticas, em emissões de kg de CO₂ equivalente, da unidade funcional adotada que é uma plataforma de um km com largura de 7,2 m. As tabelas A.30 a A.40 apresentam os valores separados por etapa do ciclo de vida do pavimento.

Tabela A.30 – Quantidade de CO₂ eq. emitido pelas etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 1.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 30/45.	-	96.121,660	kg CO₂ eq
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	957,783	kg CO₂ eq
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	957,783	kg CO₂ eq
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	2.107,051	kg CO₂ eq
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	426,991	kg CO₂ eq
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	4.564,271	kg CO₂ eq
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	44.137,417	kg CO₂ eq
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	788,556	kg CO₂ eq
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	1.428,480	kg CO₂ eq
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	31.976,465	kg CO₂ eq
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	125,101	kg CO₂ eq
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	68,039	kg CO₂ eq

	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2.001,210	kg CO ₂ eq
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.618,781	kg CO ₂ eq
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1.392,989	kg CO ₂ eq
1.6 Construção da camada	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1.608,752	kg CO ₂ eq
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1.961,994	kg CO ₂ eq

Tabela A.31 – Quantidade de CO₂ eq. emitido pelas etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 2.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	-	128.977,367	t
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.311,742	kg CO ₂ eq
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.311,742	kg CO ₂ eq
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	2.885,746	kg CO ₂ eq
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	737,095	kg CO ₂ eq
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	6.251,057	kg CO ₂ eq
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	60.448,732	kg CO ₂ eq
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.079,977	kg CO ₂ eq

		capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW			
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	1.956,386	kg CO ₂ eq
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	41.488,526	kg CO ₂ eq
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	171,337	kg CO ₂ eq
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	116,480	kg CO ₂ eq
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2.203,358	kg CO ₂ eq
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	2.217,021	kg CO ₂ eq
1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1907,831	kg CO ₂ eq
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2203,359	kg CO ₂ eq
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2686,976	kg CO ₂ eq

Tabela A.32 – Quantidade de CO₂ eq. emitido pelas etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 3.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
-------	------------	-----------------	-------------------------------------	------------	---------

1. Revestimento	4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	-	136.601,159	kg CO₂ eq
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	709,906	kg CO₂ eq
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.064,859	kg CO₂ eq
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	2.839,616	kg CO₂ eq
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	791,214	kg CO₂ eq
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	7.806,941	kg CO₂ eq
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	60.580,889	kg CO₂ eq
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.348,783	kg CO₂ eq
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	1.960,663	kg CO₂ eq
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	47.143,687	kg CO₂ eq
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	184,584	kg CO₂ eq
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	125,492	kg CO₂ eq
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2332,698	kg CO₂ eq

1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	2388,451	kg CO₂ eq
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2055,373	kg CO₂ eq
1.6 Construção da camada	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2373,690	kg CO₂ eq
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2894,747	kg CO₂ eq

Tabela A.33 – Quantidade de CO₂ eq. emitido pelas etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 4.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011471	Concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial	-	145.061,857	kg CO₂ eq
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1476,659	kg CO₂ eq
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1476,659	kg CO₂ eq
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	3248,236	kg CO₂ eq
	M0028	Pó de pedra	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	7677,577	kg CO₂ eq
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	658,314	kg CO₂ eq
1.2 Extração e fabricação de insumos	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	63.000,145	kg CO₂ eq
1.3 Transporte para a usina de asfalto	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	2038,960	kg CO₂ eq

1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	52055,365	kg CO₂ eq
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	225,825	kg CO₂ eq
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	153,524	kg CO₂ eq
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2.456,562	kg CO₂ eq
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	2483,821	kg CO₂ eq
1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2124,926	kg CO₂ eq
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2443,687	kg CO₂ eq
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3541,593	kg CO₂ eq

Tabela A.34 – Quantidade de CO₂ eq. emitido pelas etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 5.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 30/45.	-	164.779,950	kg CO₂ eq
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.641,911	kg CO₂ eq
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.641,911	kg CO₂ eq
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	3.612,093	kg CO₂ eq

	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	731,985	kg CO ₂ eq
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	7.824,472	kg CO ₂ eq
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	75.663,921	kg CO ₂ eq
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.351,810	kg CO ₂ eq
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	2.448,828	kg CO ₂ eq
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	54.816,800	kg CO ₂ eq
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	214,456	kg CO ₂ eq
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	116,643	kg CO ₂ eq
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3.430,604	kg CO ₂ eq
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	2.775,047	kg CO ₂ eq
1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2.388,045	kg CO ₂ eq
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2.758,009	kg CO ₂ eq

E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3.363,418	kg CO ₂ eq
-------	--	--	-----------	-----------------------

Tabela A.35 – Quantidade de CO₂ eq. emitido pelas etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 6.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	-	193.007,790	t
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.965,438	kg CO ₂ eq
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.965,438	kg CO ₂ eq
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	4.323,829	kg CO ₂ eq
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	876,218	kg CO ₂ eq
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	9.366,220	kg CO ₂ eq
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	90.572,815	kg CO ₂ eq
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1618,175	kg CO ₂ eq
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	2931,332	kg CO ₂ eq
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	62.163,943	kg CO ₂ eq
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	256,715	kg CO ₂ eq

	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	174,530	kg CO ₂ eq
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3285,281	kg CO ₂ eq
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	3.321,853	kg CO ₂ eq
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2.858,491	kg CO ₂ eq
1.6 Construção da camada	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3.301,412	kg CO ₂ eq
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	4.026,098	kg CO ₂ eq

Tabela A.36 – Quantidade de CO₂ eq. emitido pelas etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 7.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011466	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	-	230.232,591	kg CO₂ eq
	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.097,127	kg CO ₂ eq
1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.645,684	kg CO ₂ eq
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	4.388,495	kg CO ₂ eq
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	1.019,046	kg CO ₂ eq
1.2 Extração e fabricação de insumos	M0028	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	12.065,270	kg CO ₂ eq

	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	11.2344,039	kg CO ₂ eq
1.3 Transporte para a usina de asfalto	E9579	Transporte de areia média - Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ / 15t de potência - 210 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	2084,480	kg CO ₂ eq
	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	3635,945	kg CO ₂ eq
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	72.858,443	kg CO ₂ eq
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	285,263	kg CO ₂ eq
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	193,940	kg CO ₂ eq
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3604,931	kg CO ₂ eq
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	3691,242	kg CO ₂ eq
1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3176,364	kg CO ₂ eq
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3668,565	kg CO ₂ eq
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	4473,755	kg CO ₂ eq

Tabela A.37 – Quantidade de CO₂ eq. emitido pelas etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – SimaPro – Cenário 8.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
1. Revestimento	4011471	Concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial	-	170.289,691	kg CO₂ eq

1.1 Extração, fabricação e transporte para a usina de asfalto	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.733,463	kg CO ₂ eq
	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.733,463	kg CO ₂ eq
	M1103	Pedrisco	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	3.813,151	kg CO ₂ eq
	M0028	Pó de pedra	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	9.012,813	kg CO ₂ eq
	M0344	Cal hidratada – a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	772,803	kg CO ₂ eq
1.2 Extração e fabricação de insumos	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	73.956,242	kg CO ₂ eq
1.3 Transporte para a usina de asfalto	-	Transporte de cimento asfáltico de petróleo por caminhão tanque de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	2.393,548	kg CO ₂ eq
1.4 Usina de asfalto	M1941	Óleo tipo A1	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	61.108,489	kg CO ₂ eq
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	265,096	kg CO ₂ eq
	E9021	Grupo gerador - capacidade 456 KVA - Potência 365 kW			
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	180,229	kg CO ₂ eq
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2.883,649	kg CO ₂ eq
1.5 Transporte da Usina de asfalto para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	2.915,791	kg CO ₂ eq
1.6 Construção da camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2.494,594	kg CO ₂ eq

E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2.868,702	kg CO ₂ eq
E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	4.157,657	kg CO ₂ eq

Tabela A.38– Quantidade de CO₂ eq. emitido pelas etapas de extração, fabricação e execução do serviço de imprimação – SimaPro – Todos os cenários.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
2. Imprimação	4011351	Imprimação com emulsão asfáltica	-	7.015,480	kg CO₂ eq
2.1 Extração e fabricação de insumos	M0104	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (betume)	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	2.238,899	kg CO ₂ eq
	M0104	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (querosene)	Kerosene {BR} market for kerosene APOS, U	1.831,742	kg CO ₂ eq
2.2 Transporte para a obra	-	O SICRO não quantifica o transporte do asfalto diluído (Usina até o local da construção)	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	103,515	kg CO ₂ eq
2.3 Execução do serviço	E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1.894,217	kg CO ₂ eq
	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	947,108	kg CO ₂ eq

Tabela A.39 – Quantidade de CO₂ eq. emitido pelas etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de base – SimaPro – Todos os cenários.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
3. Base	4011549	Base ou sub-base de brita graduada executada com vibroacabadora - brita comercial	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	31.335,160	kg CO₂ eq
3.1 Extração, fabricação e transporte para usina de solos	M0005	Brita 0	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	6.526,798	kg CO ₂ eq

	M0191	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	1.807,671	kg CO ₂ eq
	M0192	Brita 2	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	3.204,619	kg CO ₂ eq
	M1135	Pó de pedra	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	6.496,465	kg CO ₂ eq
3.2 Fabricação na usina de solos	E9615	Usina misturadora de solos com capacidade de 300 t/h - 44 kw	Machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	294,186	kg CO ₂ eq
	E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,40 m ³ - 195 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1.609,788	kg CO ₂ eq
3.3 Transporte para a obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	7.139,081	kg CO ₂ eq
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropeido de 27 t - 85 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1.609,788	kg CO ₂ eq
3.5 Construção da Camada	E9779	Grupo gerador - capacidade 113 KVA - Potência 84 kw	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	20,315	kg CO ₂ eq
	E9530	Rolo compactador liso auto propelido vibratório de 11 t - 97 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	740,304	kg CO ₂ eq
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1.412,079	kg CO ₂ eq
	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kw	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	480,065	kg CO ₂ eq

Tabela A.40 – Quantidade de CO₂ eq. emitido pelas etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de sub-base – SimaPro – Todos os cenários.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição SICRO	Descrição na base de dado Ecoinvent	Quantidade	Unidade
4. Sub-base	4011227	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida.		4.642,990	kg CO₂ eq
4.1 Extração e fabricação de insumos	E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	763,754	kg CO ₂ eq
4.2 Transporte de material na obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	401,573	kg CO ₂ eq
4.3 Construção da camada	E9524	motoniveladora - 93 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	705,447	kg CO ₂ eq
	E9762	rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	684,137	kg CO ₂ eq
	E9685	rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	712,698	kg CO ₂ eq
	E9577	trator agrícola sobre pneus - 77 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	491,756	kg CO ₂ eq
	E9571	caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	883,622	kg CO ₂ eq

A.7 Dados da pesquisa bibliométrica

Nas Figuras A.1 a A.3 é realizado análise bibliometria a respeito da ACV.

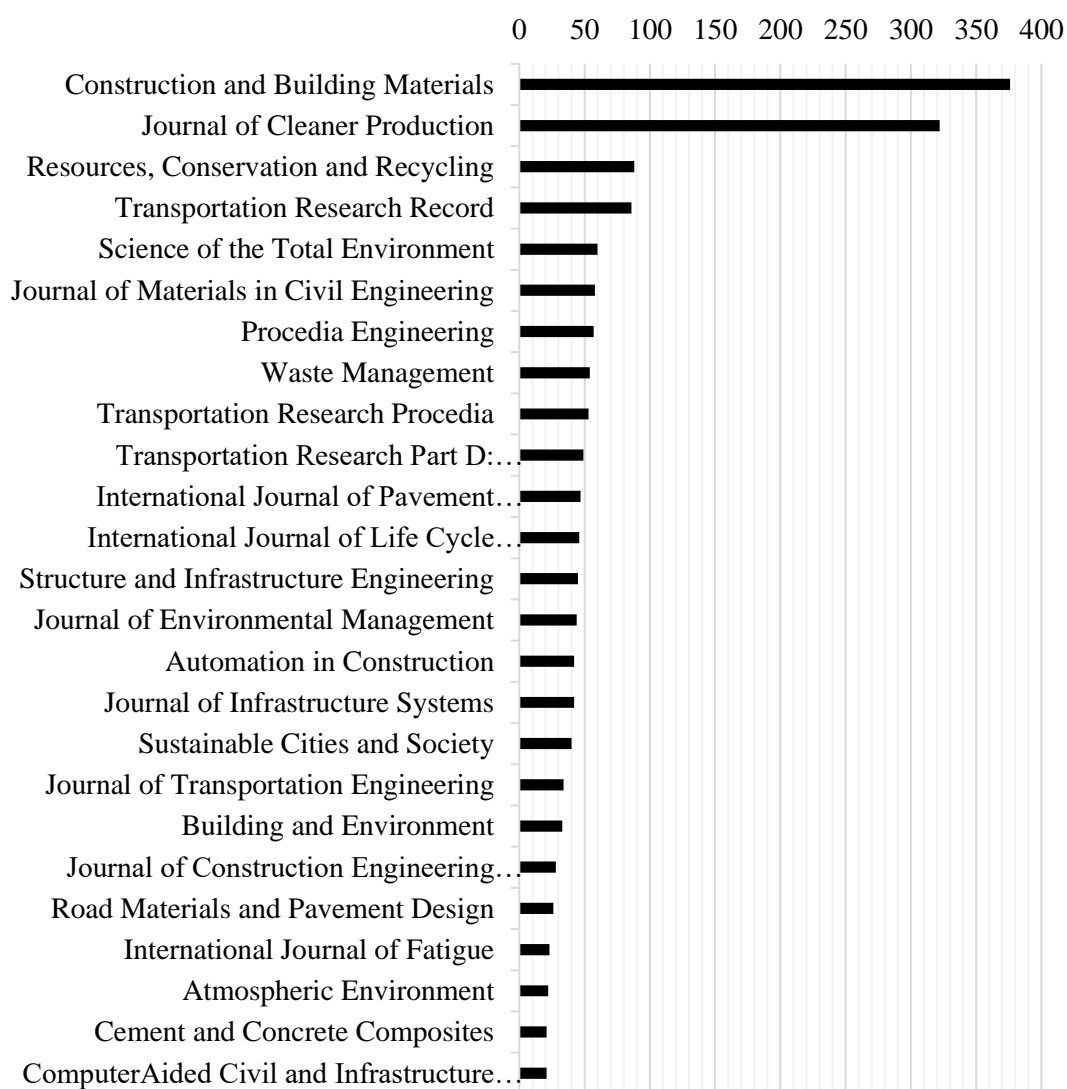


Figura A.1 – Periódicos com mais artigos científicos publicados de 2009 a 2019 dentro dos trabalhos encontrados por meio da pesquisa das palavras-chave *Life*, *Cycle*, *Assessment* e *Pavement*.



Figura A.2 – Autores com mais artigos científicos publicados de 2009 a 2019 dentro dos trabalhos encontrados por meio da pesquisa das palavras-chave *Life*, *Cycle*, *Assessment* e *Paviment*.

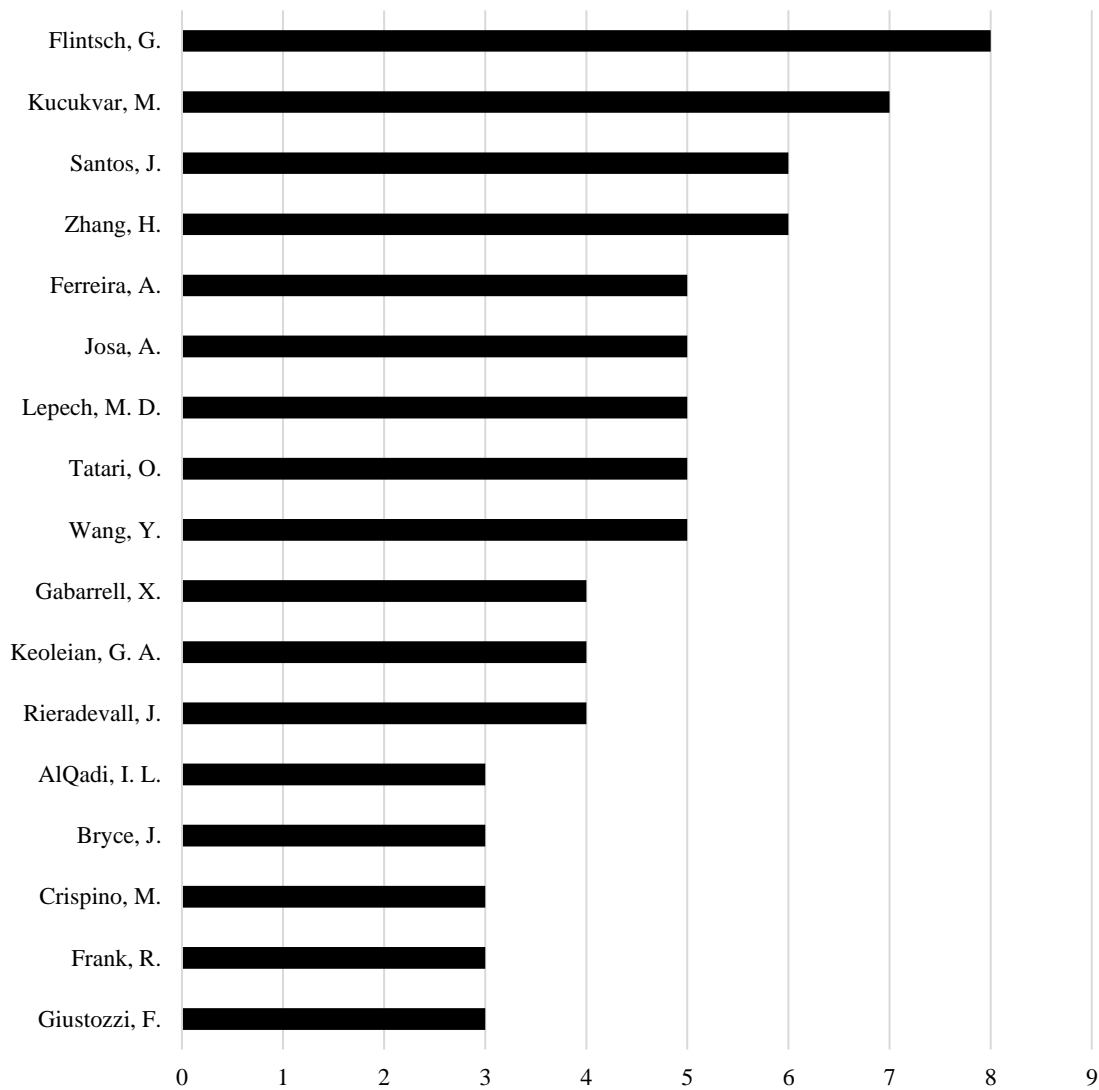


Figura A.3 – Periódicos nos quais foram publicados os artigos científicos publicados de 2009 a 2019 dentro dos trabalhos encontrados por meio da pesquisa das palavras-chave *Life, Cycle, Assessment, Pavement, Asphalt, Sustainable, Sustainability*.

ANEXO I

I. Caracterização mecânica das misturas asfálticas

As misturas asfálticas consideradas para o dimensionamento dos pavimentos e demais análises foram obtidas dos trabalhos de Flôra (2018) e CCR (2010).

Tabela I – Propriedades mecânicas do revestimento com CAP30/45.

Variável	Quantidade	Unidade
Módulo resiliente (MR)	17521	MPa
Resistência à Tração (RT)	2,67	MPa
Classe de Fadiga	3	-
FFM	0,7	(100 μ a 250 μ)
FN	345	ciclos
Massa Específica da Mistura Asfáltica	2,620	g/cm ³ ou t/m ³

Tabela II – Propriedades mecânicas do revestimento com CAP50/70.

Variável	Quantidade	Unidade
Módulo resiliente (MR)	11583	MPa
Resistência à Tração (RT)	1,7	MPa
Classe de Fadiga	1	-
FFM	0,67	(100 μ a 250 μ)
FN	/	ciclos
Massa Específica da Mistura Asfáltica	2,509	g/cm ³ ou t/m ³

Tabela III – Propriedades mecânicas do revestimento com CAP modificado por polímero.

Variável	Quantidade	Unidade
Módulo resiliente (MR)	3897	MPa
Resistência à Tração (RT)	1,39	MPa
Classe de Fadiga	1	-
FFM	1,04	(100 μ a 250 μ)
FN	/	ciclos
Massa Específica da Mistura Asfáltica	2,460	g/cm ³ ou t/m ³

Tabela IV – Propriedades mecânicas do revestimento com CAP modificado por borracha.

V Variável	Quantidade	Unidade
Módulo resiliente (MR)	4764	MPa
Resistência à Tração (RT)	1,47	MPa
Classe de Fadiga	4	-
FFM	1,19	(100μ a 250μ)
FN	/	ciclos
Massa Específica da Mistura Asfáltica	2,447	g/cm ³ ou t/m ³

II. Caracterização mecânica da base, sub-base e subleito

Os dados apresentados nas Tabelas V, VI e VII, correspondem à caracterização física e mecânica dos materiais das camadas de base, sub-base e subleito utilizadas para cálculo dos pavimentos analisados nessa tese. Essas informações foram obtidas pelo próprio *software* MeDiNa.

Tabela V – Propriedades mecânicas da base

Nome do material	Brita graduada
Tipo de material	Gnaisse C5
Coef. Poisson	0,35
k1	1149,00
K2	0,530
k3	-0,180
K4	0,000
Massa específica (g/cm ³)	2,223
Umidade Ótima (%)	5,0
Energia de compactação	Modificada
Abrasão Los Angeles (%)	43,0
psi1	0,0868
psi2	-0,2801
psi3	0,8929
psi4	0,0961

Tabela VI – Propriedades mecânicas da sub-base

Nome do material	Solo Argiloso LG'(1)
Tipo de material	Argila de Ribeirão Preto - SP
Coef. Poisson	0,45
k1	446,5
K2	0,262
k3	-0,086
K4	0,000
Massa específica (g/cm ³)	1,665
Umidade Ótima (%)	24,0
Energia de compactação	Normal
psi1	0,206
psi2	-0,24

psi3	1,34
psi4	0,038

Tabela VII – Propriedades mecânicas do subleito

Nome do material	Solo Fino NA
Coef. Poisson	0,45
k1	785,88
K2	0,340
k3	0,000
K4	0,000
Massa específica (g/cm³)	1,820
Umidade Ótima (%)	10,0
Energia de compactação	Intermediária
psi1	0,097
psi2	-1,600
psi3	1,900
psi4	0,063