

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**Asfalto ecológico: uma análise sobre a viabilidade da sua  
utilização como substituto do  
asfalto convencional**

**ALLAN FELIPE PETERLINE**

**SÃO CARLOS -SP**  
**2022**

# **Asfalto ecológico: uma análise sobre a viabilidade da sua utilização como substituto do asfalto convencional**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Francys Kley Vieira  
Moreira

São Carlos-SP  
2022



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

**NOME:** Allan Felipe Peterline

**RA:** 744362

**TÍTULO:** Asfalto ecológico: uma análise sobre a viabilidade da sua utilização como substituto do asfalto convencional

**ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira

**CO-ORIENTADOR(A):**

**DATA/HORÁRIO:** 20/04/2022, 14h

### BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira	10,0	10,0
Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio	10,0	10,0
<b>Média</b>	10,0	10,0

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira e Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira

## **AGRADECIMENTOS**

No decorrer de todo esse trajeto eu fraquejei inúmeras vezes. Por isso, eu gostaria de agradecer a Deus por ter me dado forças para continuar.

Agradeço à minha mãe, pois graças a ela eu sou o homem que hoje termina mais essa etapa; ela é o meu principal ponto de apoio e amor.

Além disso, gostaria de agradecer ao meu padrasto, pois na ausência do meu pai ele pôde preencher diversas lacunas; sou imensamente grato por isso.

Agradeço aos meus grandes amigos, pois caminhamos em estradas tortuosas juntos, dando apoio uns aos outros quando mais precisávamos; dentre eles, os que mais estiveram presentes no meu caminhar foram: Argos, Murilo, Giuliano, Daniel, Leonardo, Gustavo, Felix, Maurício, Rogério, Flávio, João e Ítalo. Independentemente do tempo, jamais esquecerei de vocês.

Não posso me esquecer daquele que me aturou por mais de três anos na iniciação científica: o professor Waldir. O que ele me ensinou é imensurável. Agradeço do fundo do meu coração.

Um agradecimento especial ao professor Francys, pois me acolheu e foi meu orientador, disponibilizando-se sempre que necessário; seus ensinamentos serão levados por mim até o fim de minha carreira.

Agradeço ao professor Carlos por ceder o seu tempo para avaliar o meu progresso; me dediquei ao máximo para mostrar que suas aulas fizeram a diferença.

Muito obrigado a todos os docentes, sem exceção. Eu cresci e me tornei o que sou hoje graças a eles; agradeço pela didática, rigidez e cobrança. Prometo ser um ótimo profissional e honrar seus ensinamentos.

Por fim, gostaria de agradecer uma pessoa que recentemente entrou na minha vida: minha namorada, Luana. Não importa a distância, o que eu sinto por você é eterno.

**DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho às mulheres mais importantes da minha vida:*

*Lucia, meu anjo em forma de mãe*

*Luana, meu futuro em forma de mulher*

## RESUMO

A produção de cimento asfáltico de petróleo (CAP) é de grande importância para o desenvolvimento da economia brasileira, visto que o transporte rodoviário foi privilegiado desde a década de 50. Outro produto fundamental para os serviços de transporte é o pneu. O CAP e o pneu estão atrelados a cadeias produtivas que geram grandes impactos ao meio ambiente. O CAP é fabricado a partir do betume, um composto gerado da destilação do petróleo; sua produção exige um consumo energético muito grande, o que é obtido a partir da queima de combustíveis fósseis – gerando a emissão de gases poluentes. Com relação ao pneu, as etapas de maiores impactos ambientais envolvem sua destinação ao fim de sua vida útil. Tendo em vista esse cenário, surge o asfalto ecológico, um CAP modificado com 20% em massa de pneu inservível moído, o que promove melhoras na qualidade do pavimento, reduz a quantidade de betume necessária para fabricação do mesmo volume de CAP e garante um destino mais ambientalmente saudável ao pneu inservível. O presente trabalho apresenta um estudo de avaliação do ciclo de vida (ACV) para a produção de pneu com diferentes destinos, produção de CAP e produção de asfalto ecológico; todos os sistemas de produto foram comparados utilizando o modelo ambiental *Environmental Footprint (Mid-point indicator)* e obteve-se indicadores (mudanças climáticas, ecotoxicidade da água doce, toxicidade humana cancerígena e não-cancerígena, consumo de combustíveis fósseis e consumo de água) para verificar quais os melhores cenários do ponto de vista ambiental. Constatou-se que o asfalto ecológico gerou os menores impactos ambientais, exceto na pegada hídrica. Isso foi observado majoritariamente pela diminuição da utilização de betume, sendo ele o principal causador dos impactos ambientais estudados. Já o consumo de água mais elevado foi causado pela presença da reciclagem mecânica na obtenção da borracha moída, etapa que se utiliza de uma grande quantidade de energia de hidroelétricas.

**Palavras-chaves:** asfalto, asfalto-borracha, asfalto ecológico, pneu, reciclagem, impactos ambientais.

## ABSTRACT

The production of petroleum asphalt cement (PAC) has a great importance for the development of the Brazilian economy, since road transport has been privileged since the 50's. Another fundamental product for transport services is the tire. PAC and tire are associated with supply chains that generate significant environmental impacts. PAC is made up of bitumen, a compound generated from the petroleum distillation process; its production requires a large amount of energy, which is obtained from fossil fuel burning – generating polluting gases emission. Regarding tires, the stages that have the greatest environmental impacts involve the disposal at its end-of-life. In view of this scenery, emerges the ecological asphalt, a modified PAC containing 20% by mass of ground waste tires, which improves the pavement's quality, reduces the amount of bitumen needed to manufacture the same volume of PAC and guarantees a more environmentally friendly destination to tire wastes. This work presents a life cycle assessment (LCA) of tire production with different destinations, CAP production and ecological asphalt production; all product systems were compared using the environmental model *Environmental Footprint (Mid-point indicator)* and indicators (climate change, freshwater ecotoxicity, carcinogenic and non-carcinogenic human toxicity, fossil fuel consumption and water consumption) were calculated to verify the best scenarios from an environmental point of view. It was found that ecological asphalt generated the lowest environmental impacts, except for the water footprint. This was mainly observed by the decreased use of bitumen, which is the main cause of the environmental impacts studied. The higher water consumption in the ecological asphalt life cycle was due to the mechanical recycling for obtaining ground rubber tires, a step that uses a large amount of energy from hydroelectric plants.

**Keywords:** asphalt, rubber modified asphalt, ecological asphalt, tire, recycling, environmental impacts.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

**Figura 1** - Buracos presentes nas ruas de São Paulo/SP (2021) (p. 3).

**Figura 2** - Avaliação dos consumidores sobre a qualidade das rodovias concedidas e públicas (p. 4).

**Figura 3** - Representação esquemática dos componentes do CAP (p. 7).

**Figura 4** - Esquematização do CAP em fase de solução (sol) e gel (p. 8).

**Figura 5** - Unidades de pneus para veículos leves vendidas ao redor do mundo entre 2012 e 2018 (p. 13).

**Figura 6** - Destinação dos pneus inservíveis na Europa e no EUA em 2001-2002 (p. 15).

**Figura 7** - Destinação dos pneus inservíveis no Brasil em 2006, considerando apenas os que passaram por algum tipo de reciclagem (p. 15).

**Figura 8** - Exemplo de maior consistência do asfalto ecológico (p. 18).

**Figura 9** - Esquematização simplificada dos sistemas de produtos, mostrando através das setas amarelas as possíveis destinações dos pneus usados/inservíveis (p. 23).

**Figura 10** - Sistema A: ciclo de vida do pneu com destino ao aterramento (p. 25).

**Figura 15** - Resultados dos indicadores referentes à categoria mudança climática (p. 32).

**Figura 16** - Resultados dos indicadores referentes à categoria ecotoxicidade da água doce (p. 33).

**Figura 17** - Resultados dos indicadores referentes à categoria toxicidade em humanos (cancerígeno) (p. 33).

**Figura 18** - Resultados dos indicadores referentes à categoria toxicidade em humana (não-cancerígeno) (p. 34).

**Figura 19** - Resultados dos indicadores referentes à categoria consumo de combustíveis fósseis (p. 34).

**Figura 20** - Resultados dos indicadores referentes à categoria consumo de água (p. 35).

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1** - Temperaturas nas quais ocorrem transformações físico-químicas no CAP puro (p. 6).

**Tabela 2** - Exemplos de composições químicas de asfaltos (p. 7).

**Tabela 3** - ICV dos processos de transporte de matéria prima e processamento do pneu (p. 29).

**Tabela 5** - ICV dos processos de transporte do pneu usado e sua disposição final em aterro sanitário (p. 29).

**Tabela 6** - ICV dos processos de transporte do pneu usado e sua disposição final por incineração (p. 30).

**Tabela 7** - ICV dos processos de transporte e reciclagem mecânica do pneu usado (p. 30).

**Tabela 8** - ICV de produção do CAP (p. 30).

**Tabela 9** - ICV de produção do asfalto ecológico (p. 31).

**Tabela 10** - Detalhes sobre a regionalização realizada nas etapas de transporte (p. 31).

**Tabela 11** - Categorias de impacto escolhidas para análise (p. 32).

**Tabela 12** - Percentuais de impactos referentes aos processos de cada sistema (p. 35).

**Tabela 13** - Esquematização das comparações realizadas sobre cada processo (p. 40).

*“Nós iremos rastejar pela terra, criando tudo, passo a passo”*

*Ishigami Senku (2017)*

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise do Ciclo de Vida
ANUT	Associação Nacional dos Usuários do Transporte de Carga
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> Sociedade Americana de Testes e Materiais
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAP-m	Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CTUH	<i>Comparative Toxic Unit for human</i> Unidade Tóxica Comparativa para humanos
DMTA	<i>Dynamic Mechanical Thermal Analysis</i> Análise Térmica Dinâmico Mecânica
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i> Calorimetria De Varredura Diferencial
Et. al	<i>et alii</i> E outros
EUA	Estados Unidos da América
GEE	Gases de Efeito Estufa
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> Organização Internacional de Normalização
MM	Massa Molar
NR	<i>Natural rubber</i> Borracha Natural
ONU	Organização das Nações unidas
PPA	Poliftalamida
PVC	Policloreto de vinila
Regap	Refinaria Gabriel Passos
Replan	Refinaria de Paulínia
SBR	Styrene-Butadiene Rubber Borracha de Estireno Butadieno

SBS	Styrene-Butadiene-Styrene Estireno-Butadieno-Estireno
Sol	Solução
T <sub>g</sub>	Temperatura de transição vítrea
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$	micro ( $10^{-6}$ )
k	kilo ( $10^3$ )
M	mega ( $10^6$ )
m	metro – unidade de comprimento
J	joule – unidade de energia
$^{\circ}\text{C}$	graus celsius – unidade de temperatura
%	percentual
g	grama – unidade de massa
$\text{m}^3$	metro cúbico – unidade de volume
W	watt – unidade de potência
h	hora – unidade de tempo

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1. Rodovias: o cenário nacional .....	3
2.2. Asfalto convencional .....	5
2.3. Materiais elastoméricos .....	9
2.4. Asfalto-borracha.....	10
2.5. Reciclagem de pneus.....	12
2.6. Asfalto ecológico .....	16
2.7. Avaliação do ciclo de vida (ACV) aplicada ao asfalto ecológico .....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	22
4.1. Objetivo e escopo da ACV .....	22
4.2. Inventário do Ciclo de vida (ICV) .....	28
4.3. Avaliação de Impactos Ambientais .....	31
5. RESULTADOS .....	32
6. DISCUSSÃO .....	36
6.1. Mudanças climáticas.....	36
6.2. Ecotoxicidade da água doce .....	37
6.3. Toxicidade humana (cancerígena).....	37
6.4. Toxicidade humana (não-cancerígena) .....	37
6.5. Consumo de combustíveis fósseis.....	38
6.6. Consumo de água.....	39
6.7. Resumo das discussões realizadas .....	39
7. CONCLUSÕES .....	40
6. REFERÊNCIAS.....	42

## 1. INTRODUÇÃO

Em 1972, na Conferência das Nações Unidas sobre o meio ambiente, iniciou-se o movimento da sustentabilidade, tendo sua motivação os impactos da atividade humana sobre o meio ambiente. Assim, a sustentabilidade é descrita como a capacidade de manter o equilíbrio entre o progresso da Humanidade e os ecossistemas naturais. Contudo, o Relatório Brundtland (1987) foi responsável por mostrar a incompatibilidade entre o desenvolvimento da sociedade, tendo em vista nossos padrões de produção e consumo, e a sustentabilidade. Surge o conceito que, posteriormente, seria um desafio para as engenharias: desenvolvimento sustentável. Essa ideia é caracterizada pelo alinhamento entre o processo de evolução humana e a sustentabilidade – em síntese, trata-se da capacidade de suprir as necessidades encontradas na sociedade sem prejudicar a homeostase presente na biosfera (CAVALCANTI, 1994; CMMAD, 1988; HURTUBIA, 1979). Ainda, além da preocupação mostrada anteriormente, na década de 1990, visando estabilizar e diminuir a concentração de gases de efeito estufa (GEE) presente na atmosfera, a Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) apresentou a Convenção Quadro Sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), a qual propôs a realização de reuniões para discutir as metas que seriam estipuladas para mitigar os efeitos desses poluentes (HILGEMBERG; GUILHOTO, 2006).

Analisando a problemática presente no parágrafo anterior, é possível identificar duas realidades que atuam de forma direta no agravamento dela: (1) destinação incorreta de pneus e (2) a produção de asfalto. Isso pode ser observado pela difícil reciclabilidade e processos de produção e descarte nocivos ao meio ambiente (FERALDI *et al.*, 2013; PIOTROWSKA *et al.*, 2019; WILDNAUER *et al.*, 2019). Os materiais elastoméricos presentes nos pneus contêm ligações cruzadas em sua estrutura macromolecular, o que torna necessário etapas adicionais – como a desvulcanização – para que a sua reciclagem mecânica se torne viável. Isto faz com que esse processo não seja majoritário na indústria, resultando em um modelo linear de desenvolvimento, pois todo elastômero utilizado na produção de pneus não retorna para a sua cadeia produtiva (BOCKSTAL *et al.*, 2019; CANEVAROLO JR., 2010; MAGALHÃES, 2015). Já para a produção asfáltica, trata-se de uma cadeia produtiva que é fundamentada principalmente na extração e destilação do petróleo, processos

que trazem grandes impactos ao meio ambiente (WILDNAUER *et al.*, 2019). Todavia, é possível encontrar soluções viáveis para esses cenários, como a formulação de um ligante asfáltico que contenha borracha reciclada mecanicamente. A literatura mostra que esse tipo de modificador traz benefícios ao desempenho tecnológico do asfalto, contudo ocorre o encarecimento – o que se deve às etapas de mistura (BERNUCCI *et al.*, 2008; FERALDI *et al.*, 2013)

A aplicação de borrachas em asfalto não é recente, porém sua utilização não é presente no asfalto brasileiro – o que é compreensível, visto que se tratava de um material defendido por patentes. Outra justificativa está presente na possibilidade de retornar o pneu à cadeia produtiva de um outro produto – sendo uma pauta relativa ao desenvolvimento sustentável. Além disso, existe a redução de impactos ambientais referentes aos processos de produção de ligante asfáltico puro, pois uma fração desse produto estaria sendo substituída pela borracha de pneu reciclada mecanicamente (BERNUCCI *et al.*, 2008; FERALDI *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2018; WILDNAUER *et al.*, 2019). Essa justificativa é fundamentada, porém percebe-se a falta de resultados quantitativos sobre essa substituição na literatura, o que dificulta a análise sobre a existência de menores impactos ambientais quando se realiza a implementação de borracha de pneu reciclada mecanicamente no ligante asfáltico.

Assim, o presente trabalho teve por objetivo verificar os efeitos das principais destinações aos pneus inservíveis (aterramento, incineração e reciclagem mecânica) e estimar seus impactos ambientais, bem como verificar se a diminuição do consumo de betume é mais ambientalmente saudável do que o processo de reciclagem mecânica. Para isso, utilizou-se a avaliação do ciclo de vida (ACV), separando em cinco sistemas diferentes: A – ciclo de vida do pneu com destino em aterro sanitário; B – ciclo de vida do pneu com destino à incineração; C – ciclo de vida do pneu com destino à reciclagem mecânica; D – produção de asfalto puro; E – produção de asfalto com adição de borracha reciclada mecanicamente. Para estes cenários realizou-se a quantificação dos indicadores de impacto e suas respectivas comparações.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Rodovias: o cenário nacional

É evidente que a maior parte do transporte em território nacional é realizada em linhas rodoviárias, fruto de uma política estabelecida durante o governo de Juscelino Kubitschek (1955 - 1960) (ANDRADE; PAULA, 2010). Como consequência, é necessário um grande capital para a implementação e manutenção dessas vias – visto que o Brasil é um país continental –, o que não ocorre segundo os dados fornecidos pela Confederação Nacional do Transporte (CNT). Apesar do elevado investimento anual, cerca de um a dois bilhões de reais, estima-se que para realizar a restauração total de toda a malha viária nacional seria necessário um aporte financeiro de dez bilhões de reais – o que resulta em uma forte deficiência de reparos e, por conseguinte, uma insatisfação dos usuários (BERNUCCI *et al.*, 2008; CNT, 2016). A título de exemplo, a Figura 1 deixa explícita a falta de cuidado nas ruas paulistanas e, segundo o telejornal Bom Dia SP, a prefeitura da cidade não realizou recapeamentos durante todo o ano de 2021 (BOM DIA SP, 2022).

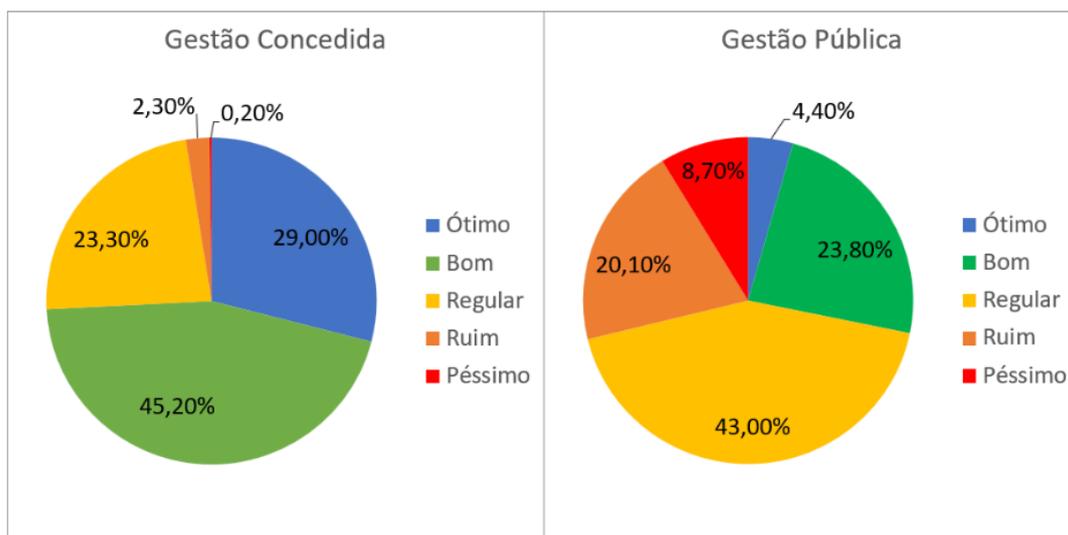


**Figura 1** - Buracos presentes nas ruas de São Paulo/SP (2021). Fonte: Reprodução/TV Globo.

Os efeitos negativos dessa má gestão influenciam de forma indireta outros setores da economia, pois geram acidentes, perdas de cargas e consumo elevado de combustível; segundo a Associação Nacional dos Usuários de Transporte (ANUT), as perdas gerais com a precariedade do setor de transporte, principalmente rodoviário, é de cinco bilhões de reais por ano. Assim, a alternativa sugerida pela ANUT é o desafogamento de linhas – seja pelo investimento em outros meios de transporte ou

pela ampliação da malha rodoviária. Todavia, o gasto estipulado para essa possibilidade é de 24 bilhões de reais por ano – o que torna essa saída pouco atrativa para a aplicação de capital (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Em vista dessa incapacidade de manutenção pública, com o objetivo de diminuir gastos e melhorar as estradas, na década de 90 foi iniciado o Programa de Concessões de Rodovias Federais (Portaria Ministerial nº 10/93), o qual visava ceder ao setor privado 30% da extensão rodoviária federal (BRASIL, 1993). A longo prazo, como observado na Pesquisa CNT de Rodovias (2021), a iniciativa privada gerou resultados mais positivos em comparação à administração pública – o que é justificado pela menor gestão e maiores investimentos por quilômetro (km) de rodovia (CNT, 2021). Ainda, a avaliação dos utilizadores mostrou um grande descontentamento com a malha rodoviária pública, como é mostrado nos gráficos a seguir (Figura 2).



**Figura 2** - Avaliação dos consumidores sobre a qualidade das rodovias concedidas e públicas. Fonte: Adaptado de Pesquisa CNT de Rodovias (2021).

Tendo em vista a Figura 2, nota-se a presença de uma inversão dos valores em relação à qualidade. Nas concessões, apenas 25,80% das avaliações se encontram em regulares, ruins ou péssimas; por outro lado, somente 28,20% das vias públicas foram caracterizadas como ótimas ou boas. Nota-se também que o maior subsídio encontrado nas concessões está implementado em melhores sinalizações e

asfaltos mais resilientes ao intemperismo e elevado trânsito de veículos pesados – considerando que a geometria das vias apresentou avaliações semelhantes, como mostrado nas pesquisas (CNT, 2016, 2021).

Nesse cenário de má administração, o setor público precisa se apoiar em soluções que se enquadrem no contexto financeiro do país – considerando os gastos elevados citados anteriormente. De acordo com BERNUCCI et al. (2008), os recursos mais convenientes para resolver essa problemática se encontram dentro das universidades públicas, pois estas contam com uma infraestrutura laboratorial apropriada para o desenvolvimento de materiais alternativos e, conseqüentemente, novas patentes – tornando possível a implementação de um pavimento mais barato e resiliente, o que diminui o custo e a frequência de reparos.

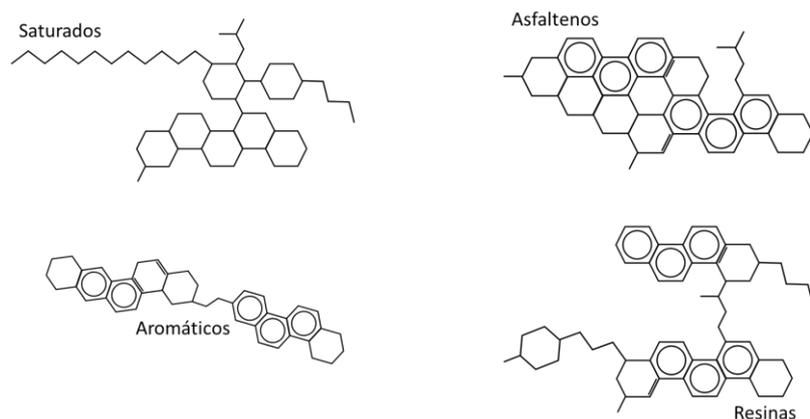
## **2.2. Asfalto convencional**

O ligante asfáltico encontrado majoritariamente nas rodovias brasileiras é caracterizado como um ligante betuminoso (betume) obtido através do petróleo, recebendo o nome de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). O material em questão apresenta propriedades diferentes em função da temperatura na qual é submetido; de forma simplificada, o CAP é semissólido em baixas temperaturas, viscoelástico em temperatura ambiente e líquido em altas temperaturas (BERNUCCI *et al.*, 2008). Além disso, essa natureza viscoelástica, em temperatura ambiente, determina faixas de comportamentos mecânicos, as quais estão separadas de acordo com a velocidade, tempo e intensidade de carregamento, como observado por SUBHY (2017) e NOTANI e NEJAD (2019). Os pesquisadores, através das técnicas análise térmica dinâmico-mecânica (DMTA) e calorimetria de varredura diferencial (DSC), determinaram o comportamento do material em sua forma pura – sem aditivos ou modificadores. Essa dependência observada entre a característica do carregamento e a temperatura do sistema é denominada de termoviscoelasticidade, um aspecto que caracteriza o ligante asfáltico na deformação máxima tolerável e resistência a formação de trincas – considerando as solicitações termomecânicas durante a utilização do material. A Tabela 1 apresenta uma compilação das principais temperaturas em que ocorrem transformações físico-químicas no CAP puro (SUBHY, 2017; NEJAD, NAZARI e NADERI, 2017; NOTANI e NEJAD, 2019; PLANCHE *et al.*, 1998; INCHEM, 2004).

**Tabela 1** - Temperaturas nas quais ocorrem transformações físico-químicas no CAP puro. Fonte: adaptado de (SUBHY, 2017), (NEJAD *et al.*, 2017), (NOTANI *et al.*, 2019), (PLANCHE *et al.*, 1998) e (INCHEM, 2004).

Ponto de fusão	54 a 173 °C
Ponto de amolecimento	50 °C
Transição vítrea	-50 a 0 °C e 40 a 80 °C
Temperatura de início de cristalização	80 °C
Ponto de independência de carga	60 °C
Ponto de fulgor	275 °C
Ponto de ignição	400 °C

O comportamento reológico encontrado nos CAP é explicado pela sua estrutura, a qual se assemelha aos oligômeros – conjunto de cadeias de baixas massas molares (MM), um estágio que antecede os materiais poliméricos (CANEVAROLO JR., 2010). A MM nos asfaltos se encontra entre 700 e 900 g/mol, um valor menor que o esperado, considerando o comportamento mecânico do material em questão. Sob temperatura ambiente, o CAP é viscoelástico, característica que poderia ser gerada pelo emaranhamento entre cadeias poliméricas longas; como as cadeias são curtas, os estudos indicam que ocorre uma estruturação por ligações químicas e físicas, as quais unem pequenos arranjos (aglomerados de moléculas) em uma rede tridimensional, recebendo o nome de associação molecular (BERNUCCI *et al.*, 2008; SHELL, 2015). Outro fator a ser explicitado é o tipo de molécula presente nesse sistema, pois sua arquitetura irá reger a solubilidade e viscoelasticidade do ligante asfáltico. Os tipos citados pela SHELL (2015) são: saturados – cadeias lineares e ramificadas de hidrocarbonetos sem insaturações, o que gera um óleo viscoso e transparente –; asfaltenos – aglomerados de hidrocarbonetos naftênicos polares ou polarizáveis (associação moleculares), são sólidos amorfos insolúveis de coloração preta ou marrom –; aromáticos – moléculas polares, possuem baixa MM e são observadas na forma de um líquido amarelo viscoso, compondo o meio de dispersão dos asfaltenos –; e resinas – moléculas polares e solúveis em n-heptano, encontradas na forma de sólidos ou semissólidos e, juntamente com os asfaltenos, regem o comportamento viscoso do CAP pela formação de micelas (BERNUCCI *et al.*, 2008; CHILINGARIAN; YEN, 1978; SHELL, 2015). Tais estruturas são ilustradas na Figura 3.



**Figura 3** - Representação esquemática dos componentes do CAP. Fonte: adaptado de SHELL (2015).

A natureza química do betume, principal componente do CAP, é decorrente do tipo de petróleo utilizado; de acordo com a SHELL (2015), apenas uma pequena fração dos 1.500 tipos de petróleos explorados podem ser utilizados na fabricação do CAP. Por consequência, as composições de cada material variam em função do tipo de óleo cru utilizado, influenciando diretamente a qualidade do pavimento fabricado. A literatura aponta que os petróleos venezuelanos, Boscan e Bachaquero, dão origem ao asfalto de melhor desempenho presente no mercado global. Já o Brasil é autossuficiente na produção de CAP, aproximando-se da qualidade venezuelana, resultado de uma combinação de mais de um tipo de petróleo. Em síntese, a composição do asfalto é obtida com 90 a 95% de hidrocarbonetos e 5 a 10% de heteroátomos, variando de acordo com o citado anteriormente. A Tabela 2 apresenta exemplos dos tipos de CAPs presentes no mercado e suas composições químicas (BERNUCCI *et al.*, 2008).

**Tabela 2** - Exemplos de composições químicas de asfaltos. Fonte: adaptado de (BERNUCCI *et al.*, 2008)

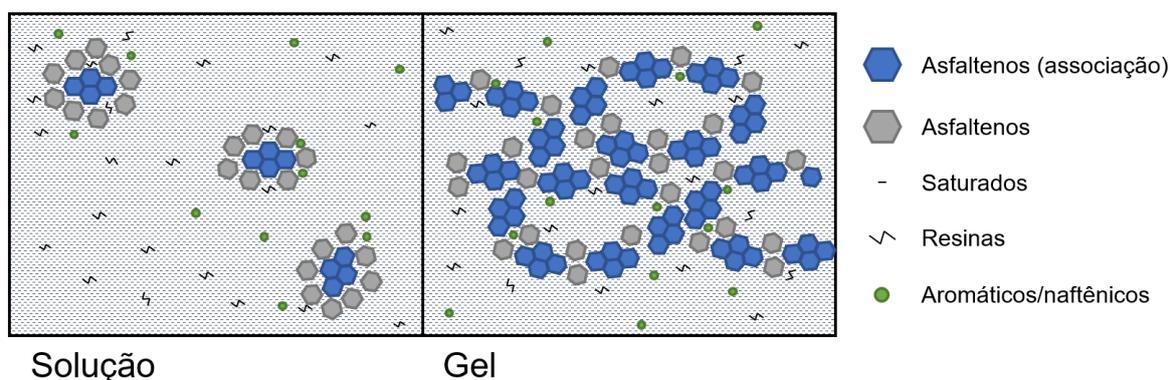
	País/Região					
	México	Venezuela	Estados Unidos	Brasil (Regap*)	Brasil (Replan**)	Oriente Médio
Carbono (% m/m)	83,8	82,9	86,8	86,5	85,4	83,9
Hidrogênio (% m/m)	9,9	10,4	10,9	11,5	10,9	9,8
Nitrogênio (% m/m)	0,3	0,8	1,1	0,9	0,9	0,5
Enxofre (% m/m)	5,2	5,4	1	0,9	2,1	4,4
Oxigênio (% m/m)	0,8	0,3	0,2	0,2	0,7	1,4
Vanádio (ppm)	180	1.380	4	38	210	78
Níquel (ppm)	22	109	6	32	66	24

\* Regap - Refinaria Gabriel Passos, Betim/MG.

\*\* Replan - Refinaria Planalto de Paulínia, Paulínia/SP

Analisando as colunas que apresentam os dados brasileiros, nota-se que o processo de refino do óleo cru pode influenciar na composição final do asfalto, uma situação plausível, visto que a tecnologia de refino pode variar em algumas etapas de acordo com a infraestrutura disponível em cada refinaria (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Além do apresentado na Tabela 2, há a composição em relação a arquitetura das moléculas que estão presentes no CAP (Figura 3), o que também irá variar segundo os critérios anteriormente citados – tipos de petróleo e técnicas de refino. Essas variações afetam de forma direta o comportamento reológico do ligante asfáltico, pois tais componentes possuem funções diferentes dentro do CAP, diminuindo ou aumentando sua viscosidade (BERNUCCI *et al.*, 2008; SHELL, 2015). Como observado na esquematização abaixo (Figura 4), apesar de um baixo emaranhamento entre as cadeias, existem pontos de ancoragem: os blocos de asfaltenos (gel). Em virtude disso, obtém-se um comportamento semelhante àquele observado nos materiais poliméricos semicristalinos, onde os domínios cristalinos ancoram a fase amorfa quando se ultrapassa a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) (NEJAD *et al.*, 2017; NOTANI *et al.*, 2019).



**Figura 4** - Esquematização do CAP em fase de solução (sol) e gel. Fonte: adaptado de SHELL (2015).

Assim, nota-se outro comportamento semelhante aos dos polímeros, o que está relacionado ao movimento das moléculas em relação a temperatura. Como observado na Tabela 1, existem duas faixas bem distintas de  $T_g$ , o que se deve às diferentes estruturas moleculares presentes no CAP; acima da faixa de -50 a 0 °C todas as moléculas apresentam mobilidade, exceto os asfaltenos associados. Essa

imobilidade é mantida até a faixa de 40 a 80 °C, onde as ligações secundárias se desmancham e as micelas de asfaltenos ganham mobilidade (sol). Nessa etapa, aproximadamente em 60 °C, percebe-se que o comportamento do asfalto se aproxima ao de substâncias líquidas – onde a viscosidade não é influenciada pela carga aplicada. Outro fenômeno térmico encontrado nesse material é a formação de pequenos domínios cristalinos, os quais são gerados pela sobreposição de asfaltenos associados, gerando assim pequenas regularidades na estrutura do material – todavia, a literatura não apresenta informações consistentes sobre a influência da cristalinidade do CAP, uma vez que o grau apresentado é pequeno (DALY; QIU, 1996).

Por fim, dada as informações obtidas do estudo bibliográfico, resume-se que o CAP é um ligante betuminoso temoviscoelástico de alta complexidade estrutural e, em relação às estruturas e propriedades, possui características mecânicas passíveis de modificações, podendo ser realizado pela presença de pontos de ancoragem – atuação semelhante aos asfaltenos. Tais mudanças deslocariam as temperaturas de transições e poderiam conferir mais elasticidade ao material. Assim, o asfalto convencional pode ser modificado por outros agentes a fim de diminuir a quantidade de betume necessária para produção de CAP e aumentar a durabilidade, reduzindo assim a necessidade frequente de reparos (BERNUCCI *et al.*, 2008; WILDNAUER *et al.*, 2019).

### **2.3. Materiais elastoméricos**

Os materiais elastoméricos se encontram dentro da classe dos polímeros, mas apresentam características bem marcantes em relação aos demais materiais dessa classe. Elastômeros são materiais que podem deformar até 200% em temperatura ambiente; quando a carga que causou a deformação é retirada eles retornam rapidamente ao formato inicial, possuindo uma recuperação elástica total. Esse tipo de comportamento é obtido por cadeias flexíveis que estão ligadas entre si – uma baixa densidade de ligações cruzadas. Essas características fazem com o material possa se deformar e retornar para o mesmo ponto (recuperação elástica), pois está “ancorado” por essas reticulações (CANEVAROLO JR., 2010; ITO, 2012).

Devido a essas propriedades nota-se uma aplicação presente na engenharia de materiais: tenacificação por elastômeros. Sua elevada tenacidade permite o

aumento dessa propriedade em outros materiais quando ocorre sua incorporação como segunda fase. Um grande exemplo disso é a tenacificação do poliestireno (PS) por polibutadieno (PB), resultando no poliestireno de alto impacto (HIPS). Ainda, essa aplicação mostra-se presente em outros materiais – como o CAP. Tal modificação é causada pelo emaranhado tridimensional presente nessa classe de polímero, o qual se espalha entre o ligante asfáltico, gerando maior elasticidade ao material (CANEVAROLO JR., 2010; SHELL, 2015).

#### **2.4. Asfalto-borracha**

As propriedades originais do CAP podem ser modificadas com a adição de resíduos poliméricos, uma técnica já aplicada pela indústria – como observado pelo uso de poliftalamida (PPA), poli(cloreto de vinila) (PVC), copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS) e/ou borracha de butadieno estireno (SBR) na composição de CAP modificados (CAP-m) (ARABANI; TALEGHANI, 2017; BECKER; MÉNDEZ; RODRÍGUEZ, 2001; GUO *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2020; PFA, [s. d.]; ZHANG; YU, 2010). A literatura apresenta diversas vantagens pela utilização de termoplásticos e elastômeros na fabricação de CAP-m, as quais são listadas abaixo em função do polímero utilizado.

- PPA – Promove um aumento na quantidade de asfaltenos no CAP e, conseqüentemente, diminui a concentração de resinas. A estrutura e comportamento do ligante são modificados ao longo do tempo, pois, apesar de apresentar um mecanismo de funcionamento desconhecido pela literatura, estudos indicam que o PPA tem a capacidade de reorganizar as associações moleculares, aumentar sua polaridade e estabilizá-las, o que aumenta a resistência ao calor e deformação (PFA, [s. d.]).
- PVC – Aumenta o ponto de amolecimento e diminui o grau de penetração; isso indica que o material se torna mais resistente em relação a temperatura e formação de sulcos – dificuldade na penetração do material. Isso ocorre pela substituição dos óleos presentes na composição asfáltica, o que diminui a viscosidade do material em temperaturas elevadas (ARABANI; TALEGHANI, 2017);

- SBS – Utilizado para produzir uma rede tridimensional contínua dentro do CAP, o que gera uma maior resistência ao sulco e elasticidade, mesmo em altas temperaturas (BECKER; MÉNDEZ; RODRÍGUEZ, 2001; LIU *et al.*, 2020);
- SBR – Esse modificador apresenta uma melhor incorporação dentro do CAP quando comparado ao SBS, o que indica uma maior solubilidade desse polímero. A literatura indica que a presença das cadeias de butil irá causar a adsorção de grupos naftênicos e ajudar na formação de associações moleculares, podendo aumentar a temperatura de amolecimento, propriedades coesivas e recuperação elástica do material (GUO *et al.*, 2020; ZHANG; YU, 2010)

Apesar das diversas tentativas de elucidar os mecanismos estruturais do asfalto durante a aplicação dos modificadores citados, torna-se difícil unificar as informações e determinar o mecanismo de atuação de cada polímero modificador (GUO *et al.*, 2020). Por outro lado, os estudos realizados traçam padrões comparativos, aliando a propriedade de cada polímero com o efeito resultante pela sua adição, o que resulta em conhecimentos empíricos e consistentes com as formulações fabricadas (BERNUCCI *et al.*, 2008; SINGH; KUMAR; MAURYA, 2013). O trabalho em questão tem o enfoque nos efeitos causados pela adição de materiais elastoméricos (asfalto-borracha), onde se enquadram dois dos materiais anteriormente citados: SBS e SBR. Tais incorporações no ligante, em ambos os casos, possuem a capacidade de aumentar a deformação máxima tolerável e resistência às trincas térmicas e de fadiga; ainda se observa a redução do envelhecimento do material (BERNUCCI *et al.*, 2008; SHELL, 2015). Contudo, em termos de nomenclatura segundo normas (ASTM, 2021, 2019), as modificações com SBS e SBR virgem, não são consideradas geradoras de asfalto-borracha, apesar de afetarem as mesmas propriedades, segundo a norma D6114/D6114M-19 (ASTM, 2019). Em vista disso, as terminologias ASTM serão desconsideradas a fim de facilitar o entendimento de relação entre classificação e propriedade. Assim, asfalto-borracha é todo CAP-m com elastômeros em sua composição, havendo o aumento na deformação máxima tolerável, na resistência à formação de trincas e retardo no envelhecimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

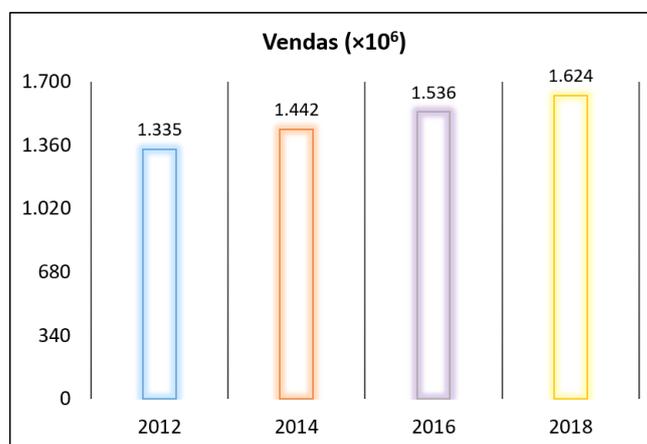
Em contraste com os benefícios trazidos pelos elastômeros, algumas complicações podem ser observadas neste uso, as quais estão atribuídas à etapa de

mistura e agitação, onde uma quantidade considerável de energia térmica é necessária para diminuir a viscosidade do CAP, mantendo a temperatura acima das  $T_g$ . Ainda, conforme a concentração de modificador é aumentada, a fim de ultrapassar a quantidade mínima para que haja garantia de qualidade, a reologia do CAP-m é alterada e a incorporação dificultada, sendo esse o principal ponto limitante para a adição de modificador. Nesse contexto, o SBS apresenta uma grande vantagem em relação ao SBR, pois, devido a possibilidade de fabricação da arquitetura “SBS estrela”, apenas 1% (% m/m) desse modificador é necessário para que as propriedades do CAP sejam alteradas, o que é justificado pela melhor incorporação dos asfaltenos nos “núcleos” das “estrelas” (BERNUCCI *et al.*, 2008). Contudo, sob uma perspectiva ambiental, o SBS poderia ser utilizado em outros produtos reciclados, uma vez que se trata de um elastômero que não apresenta ligações cruzadas, podendo ser submetido a outras técnicas de processamento, como a injeção (CANEVAROLO JR., 2010; HUY *et al.*, 2004). Ainda, considerando os impactos ambientais causados pelo sistema de produção do CAP (FERALDI *et al.*, 2013; WILDNAUER *et al.*, 2019), a situação mais conveniente seria um CAP-m que apresentasse uma fração significativa de resíduos de borracha – o que não ocorre com o SBS, pois sua adição varia entre 3% e 5% em massa (KARIM, 2018). Em contrapartida, a utilização de SBR é caracterizada pela presença mínima de 20% – valor estipulado através da norma D6114/D6114M-19 (ASTM, 2019) –; um cenário que apresenta vantagem ambiental, visto que a quantidade de CAP necessária para realizar a mesma pavimentação irá diminuir em 20%. Contudo, ao se adicionar um novo material na cadeia produtiva do CAP-m, faz-se necessário verificar um novo sistema de produto, o qual está relacionado com a produção do modificador (ABNT, 2009a, b), e partindo-se dessas considerações estabelecer qual opção causa menor impacto ambiental.

## **2.5. Reciclagem de pneus**

Uma problemática encontrada pela engenharia de materiais é a destinação e o tratamento de resíduos elastoméricos e termofixos, tendo em mente a baixa reciclabilidade associada à natureza desses materiais (PICKERING, 2006). Essa dificuldade é causada pelas ligações cruzadas presentes nos polímeros em questão, o que impossibilita o reprocessamento de forma direta (CANEVAROLO JR., 2010).

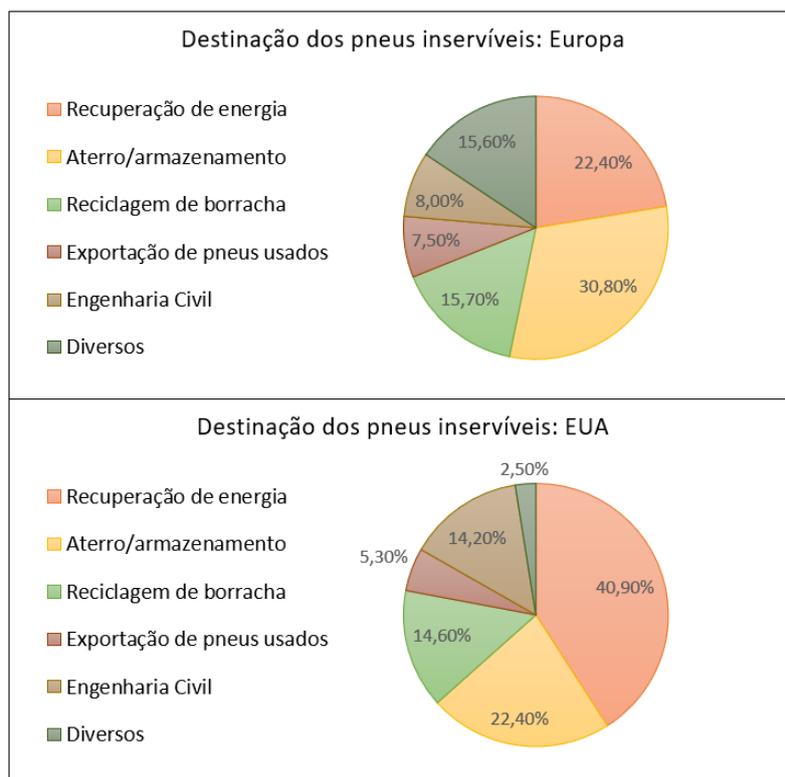
Tal situação se torna ainda mais preocupante ao se considerar a utilização de um produto indispensável para o desenvolvimento da sociedade moderna, o qual consome um volume considerável da produção de borracha mundial: o pneu (BERNUCCI *et al.*, 2008; ERMAN; MARK; ROLAND, 2013). Como observado no gráfico abaixo (Figura 5), as vendas mundiais de pneus de veículos leves não apresentaram nenhuma queda entre os anos de 2012 e 2018, além de haver projeções positivas de consumo até 2030 (BRYAN GARNIER & CO., 2017). O mesmo resultado é observado em outras pesquisas de mercado, obtendo-se uma curva crescente de consumo mundial para todos os tipos de pneus (KINGPIN MARKET RESEARCH, 2020; TRANSPARENCY MARKET RESEARCH, 2020).



**Figura 5** - Unidades de pneus para veículos leves vendidas ao redor do mundo entre 2012 e 2018. Fonte: adaptado de BRYAN, GARNIER & CO. (2017).

Em vista desse crescimento, é importante ressaltar que o produto em questão apresenta uma tecnologia de difícil reaproveitamento, pois é composto de uma armação metálica e diferentes camadas de materiais, o que torna difícil a separação da fase borracha (BOCKSTAL *et al.*, 2019); a inviabilidade de retornar produtos usados ao ciclo de produção caracteriza o sistema de desenvolvimento linear, o qual é descrito por (ZANIN; MANCINI, 2009) como insustentável, uma vez que novos recursos precisarão ser extraídos da natureza a cada nova fabricação de pneus. Essa impraticabilidade foi observada em 2001-2002 (Figura 6), visto que a maior fração dos pneus utilizados na Europa e nos Estados Unidos da América (EUA) foi destinada ao aterro sanitário e recuperação energética (53,20% e 63,3%, respectivamente à Europa e ao EUA). Tais índices revelam a falta de interesse na reciclagem que

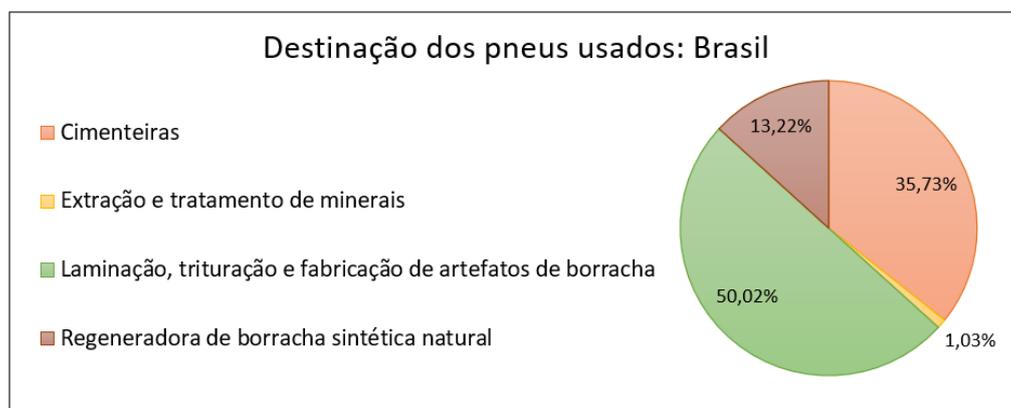
envolve a desvulcanização da borracha, visto que em ambas as localidades apresentaram aproximadamente 15% desse processo (ETRA; RMA, 2003). Apesar de se tratar de uma pesquisa desatualizada, dados recentes do Departamento de Ecologia do Estado de Washington (2020) revelam que os dados apresentados em 2001-2002 são semelhantes aos valores de 2017 (WASHINGTON, 2020) – analisando apenas a condição americana.



**Figura 6** - Destinação dos pneus inservíveis na Europa e no EUA em 2001-2002. Fonte: adaptado de European Tyre Recycling Association (Associação Europeia de Reciclagem de Pneus - ETRA) e Rubber Manufacturers' Association (Associação dos Fabricantes de Borracha do EUA).

Em relação ao contexto brasileiro, estudos realizados por (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008) acerca da fabricação de pneus destacaram a produção nacional de 54,5 milhões, exportação de 21,4 milhões e importação de 18,7 milhões – o que resultou em valor total de 51,8 milhões de pneus novos em território nacional no ano de 2006. Ainda pelo estudo anterior, estipula-se que no mesmo período houve a reciclagem de 48,12 milhões de pneus inservíveis, considerando retorno energético e de material. Como observado na Figura 7, a maior parte (50,02%) dos pneus

destinados à reciclagem são utilizados em processos mecânicos, resultando em grânulos, laminados e pós de borracha, produtos que são utilizados em tapetes de borracha, solados de calçados, isolamento acústico e na modificação do CAP. Por outro lado, a desvulcanização apresenta um valor bem menor comparado ao da reciclagem mecânica – sendo apenas 13,22% de todo pneu reciclado em 2006. Desse processo obtém-se a borracha sem ligações cruzadas, o que possibilita a conformação para diversos tipos de produtos. Os processos de extração e tratamento de minerais apresentam o menor consumo de pneus inservíveis (1,03%), sendo proveniente do pequeno volume da estrutura metálica presente nos mesmos. Por fim, a reciclagem energética no Brasil apresenta um grande percentual da destinação de pneus inservíveis (35,73%) e é realizada através da queima de pneus triturados, servindo como combustível nos fornos de cimento (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008). Ainda que o estudo mencionado esteja distante da atualidade, ele apresenta grande detalhamento dos valores citados e se assemelham aos resultados mais atuais de 2017 (DOS SANTOS; DUVOISIN JUNIOR; MACHADO, 2020).



**Figura 7** - Destinação dos pneus inservíveis no Brasil em 2006, considerando apenas os que passaram por algum tipo de reciclagem. Fonte: adaptado de (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008).

Apesar do método de reciclagem energética ser amplamente utilizado (ETRA; RMA, 2003; LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008), apresenta uma forte inviabilidade econômica por dois motivos: (1) necessita de um grande aporte financeiro para tornar todo esse procedimento seguro e dentro das normas ambientais, sendo, em 2006, um valor estipulado de US\$14.000/tonelada (CONAMA, 2005; LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008); (2) possui um baixo rendimento energético, considerando a energia

utilizada na fabricação do pneu – com uma eficiência de 100%, apenas 40% dessa energia seria recuperada; o rendimento de incineradoras de combustíveis sólidos apresentam uma faixa entre 35% a 45%, o que resultaria em uma recuperação líquida de aproximadamente 16% de toda energia utilizada na produção de pneus (EBOH, 2019; LABOY-NIEVES, 2014).

Logo, até os dias atuais existem estudos que buscam soluções viáveis de destinação para os materiais elastoméricos inservíveis, sendo observado novas técnicas de desvulcanização e reciclagem mecânica (BERNUCCI *et al.*, 2008; BOCKSTAL *et al.*, 2019; MAGALHÃES, 2015). Realizando uma análise comparativa entre os dois métodos anteriormente citados, nota-se que ambos apresentam a etapa inicial de beneficiamento mecânico, a qual é descrita por (ZANIN; MANCINI, 2009); a principal diferença está na desvulcanização, sendo necessária uma etapa adicional que envolverá tratamentos físicos, químicos ou biológicos – tratando-se de possíveis agravantes de impactos ambientais (MAGALHÃES, 2015). Assim, apesar das técnicas de desvulcanização apresentarem vantagens ambientais e econômicas em relação à reciclagem energética e ao aterramento, como é descrito pela literatura, ela apresenta desvantagens em relação a reciclagem mecânica, visto que a trituração já é uma subetapa da desvulcanização (BOCKSTAL *et al.*, 2019).

À vista disso, percebe-se que o principal problema encontrado para a destinação dos pneus inservíveis, a fim de reduzir os gastos e impactos ambientais causados pela reciclagem energética e disposição em aterros, está na baixa demanda e incentivo de produtos beneficiados pela reciclagem mecânica. Dessa forma, torna-se necessário um mercado que viabilize o consumo em larga escala do pneu reciclado mecanicamente, na forma de grânulos, tiras ou pós.

## **2.6. Asfalto ecológico**

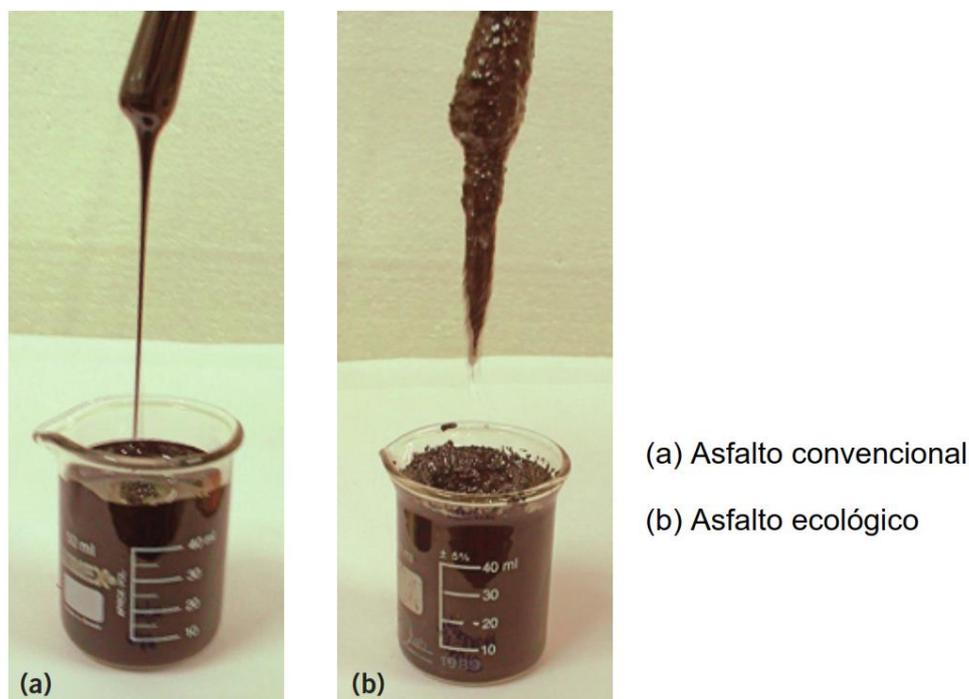
O presente trabalho propõe a análise da viabilidade ambiental de utilização do asfalto ecológico, uma denominação para um CAP-m, cujo modificador principal é o pó de borracha obtido de pneus descartados (pós-uso). A nomenclatura usual encontrada na bibliografia para este tipo de CAP-m é “asfalto-borracha”, pois o modificador é um material elastomérico (ASTM, 2019; BERNUCCI *et al.*, 2008). Contudo, como a fonte de matéria prima trata-se de pneus inservíveis, algumas fontes, principalmente no mercado de pavimentação (ETESCO, 2021; FRAGMAQ,

2016), utilizam-se do termo “asfalto ecológico”, o que se trata de uma especificação da origem do modificador. Além disso, como dito no tópico 2.4, a definição de asfalto-borracha está diferente da proposta pela norma ASTM D6114/D6114M-19, o que torna necessário uma nova classificação para os asfaltos modificados por pneu moído. Assim, se apoiando nos termos de mercado e em normas técnicas (ASTM, 2019; ETESCO, 2021; FRAGMAQ, 2016), asfalto ecológico é todo CAP-m que tem valores iguais ou maiores que 20% em massa de borracha reciclada mecanicamente de pneus inservíveis.

Deste modo, como mencionado anteriormente nos itens 2.1 e 2.5, faz-se necessário novas tecnologias na área de pavimentação asfáltica, a fim de reduzir o custo de implementação e reparos. Já em relação aos pneus inservíveis, constatou-se que é preciso um grande mercado consumidor para esse material reciclado mecanicamente, o que reduziria impactos de incineração e aterramento (FERALDI *et al.*, 2013; LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008). Logo, percebe-se que existe uma ampla viabilidade do consumo de pneus inservíveis pelo mercado de CAP-m, o que se deve pelo volume de demanda e possibilidade de implementação de um material com uma nova tecnologia (BERNUCCI *et al.*, 2008). Apesar disso, a adição desse mercado nos pavimentos brasileiros está bem lenta, pois a possibilidade de aplicação ingressou no mercado nacional na virada do século, quando todas as indústrias já estavam fundamentadas em um modelo convencional de asfalto (SILVA *et al.*, 2018). Logo, em razão da falta de conhecimento e adaptação fabril, o asfalto ecológico não é considerado com substituto adequado para o atual material utilizado. A mudança desse pensamento pode ser realizada através de novos estudos, o que é mostrado pela literatura utilizada, a qual justifica sua implementação pelas propriedades resultantes (vide 2.5); apesar de ser um grande atrativo industrial, a defesa de utilização não pode ser realizada apenas pelas características finais do produto. Isto posto, percebe-se que outro ponto de interesse poderia ser abordado para fomentar a utilização de pneu moído como modificador, como perspectivas ambientais e sustentáveis. É sabido que a justificativa de economia não é legítima, levando em consideração apenas o custo do asfalto ecológico, visto que o gasto de produção é mais elevado. Porém, o aumento da vida útil desse CAP-m é substancial, fazendo com que o valor de investimento inicial seja restabelecido ao longo prazo – tendo em mente a diminuição de reparos (BERNUCCI *et al.*, 2008; FERALDI *et al.*, 2013).

Ainda, como antes mencionado, a tecnologia de asfalto ecológico é recente no Brasil, o que é justificado pela patente americana sobre o material – recentemente expirada. Tendo em mente essas novas possibilidades, considerando a infraestrutura das usinas asfálticas presentes no país, percebe-se que a incorporação do pó de borracha pode ser realizada apenas com pequenas alterações nos parâmetros de misturas – sendo necessário estabelecer o tempo ideal de incorporação e a temperatura do sistema. Logo, o processo total para fabricação do asfalto ecológico envolveria apenas a fabricação do modificador e sua mistura com o CAP (BERNUCCI *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2018).

O CAP-m resultante é caracterizado pela maior consistência – o que é definido pela quantidade de fração oleosa remanescente (saturados e aromáticos). Isso mostra que a presença da fase sólida de borracha irá atuar ancorando o movimento da componente de menor MM. Essa propriedade é medida e verificada pela viscosidade do material e a dificuldade a formação de sulcos (ensaio de penetração) (BERNUCCI *et al.*, 2008). A Figura 8 ilustra a diferença de consistência, o que é indicado pela menor fluidez do asfalto ecológico (b) em relação ao asfalto convencional (a).



**Figura 8** - Exemplo de maior consistência do asfalto ecológico. Fonte: adaptado de (BERNUCCI *et al.*, 2008).

## **2.7. Avaliação do ciclo de vida (ACV) aplicada ao asfalto ecológico**

Todo produto, independentemente de sua complexidade, apresenta etapas que caracterizam um ciclo de vida, o que vai desde a extração da matéria prima necessária para sua produção, até o pós-uso e descarte. Assim, em cada estágio presente nesses ciclos de vida, nota-se que há troca de fluxo de recursos naturais (materiais e/ou energia) e de emissões, o que faz necessário um estudo detalhado para verificar os possíveis impactos ambientais decorrentes desses fluxos, visto a crescente conscientização sobre a questão ambiental. À vista disso, para estabelecer padrões e garantir uma abordagem mais fiel a realidade, as normas ISO 14040 e ISO 14044 foram elaboradas para descrever os requisitos e prover orientações para a avaliação de ciclos de vida (ACV). Tais itens são listados em oito tópicos: (1) definir objetivo e escopo; (2) analisar o inventário utilizado; (3) avaliar os impactos ambientais; (4) interpretar os resultados; (5) expor uma análise crítica sobre os resultados; (6) ressaltar as limitações presentes na ACV; (7) relacionar as fases presentes no processo; e (8) estabelecer condições para a utilização de valores e elementos opcionais. O trabalho em questão se adequa ao proposto pelo procedimento de ACV na ISO 14040, o que se deve pela possibilidade e facilidade de realizações de estudos comparativos através das variações dos parâmetros ou técnicas de produção/produto e regionalizações, considerando o contexto logístico em cada ciclo de vida.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O presente trabalho possui uma abordagem não muito discutida na literatura, tratando-se de uma análise combinada de dois processos que não possuem interferências e suas produções individualizadas. Essa comparação foi realizada pela conexão entre o fim de uma cadeia produtiva e o início de outra. Dessa forma, foi possível verificar os efeitos da ausência e presença de etapas únicas em cada sistema. Para embasar a argumentação realizada no presente trabalho, utilizou-se os trabalhos que estão descritos abaixo.

Estudos de ACV do pneu em uma regionalização chinesa, realizados por (SUN *et al.*, 2016), mostram que o processo de obtenção de matéria-prima para a fabricação do pneu – borracha natural (NR), SBR, negro de fumo (NF) e produtos químicos

orgânicos –, geram impactos ambientais passíveis de mitigação, como aquecimento global, potencial de acidificação, toxicidade humana e eutrofização do solo e água, principalmente no que se refere a fração de borracha presente no pneu. Uma das sugestões é a utilização de borracha recuperada. Porém, percebe-se que existe a ausência do estudo em relação aos impactos causados pelo processo de desvulcanização da borracha, o que pode ocultar efeitos maiores do que aqueles apresentados pelo estudo (SUN *et al.*, 2016).

No estudo de revisão realizado por (DONG *et al.*, 2021), encontra-se que a principal sugestão para contornar os impactos causados pelo ciclo de vida do pneu está na recuperação da borracha – sugerindo o processo de desvulcanização. Contudo, de acordo com o próprio autor, existem inconsistências nos estudos realizados, faltando especificações dos critérios de análise adotados, bem com as fontes de dados (DONG *et al.*, 2021).

Segundo BERNUCCI *et al.* (2008) e SHELL (2015), uma alternativa de fim de vida útil para o pneu é a aplicação em CAP, tendo como justificativa a melhora nas propriedades do material, sendo um substituto para o CAP-m de SBS. Outro ponto a ser destacado é o menor impacto ambiental causado por essa utilização, em aspectos de níveis de toxicidade humana e mudanças climáticas – tendo em vista que a reciclagem por desvulcanização envolve uma subetapa de beneficiamento (lavagem, trituração e separação) e, posteriormente, a revulcanização da borracha, sendo um processo que gera impactos ao meio ambiente (referindo-se a revulcanização) (BOCKSTAL *et al.*, 2019; SUN *et al.*, 2016b; ZANIN; MANCINI, 2009).

Ademais, a análise realizada por (FERALDI *et al.*, 2013) traz uma visão próxima ao estipulado nos objetivos do presente TCC. Os autores se propuseram a realizar uma ACV comparativa sobre as opções de tratamento para os pneus inservíveis dos EUA, tendo como opção a fabricação de asfalto. O pneu estadunidense apresenta três principais fins que não envolvem a desvulcanização: aterro, reciclagem energética e fabricação de CAP-m – o que também é observado no Brasil e Europa (ETRA; RMA, 2003; LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008). Tendo em mente a problemática apresentada no item 2.5, FERALDI *et al.* (2013) mostra que a recuperação energética através da queima do pneu incorre em valores insignificantes em comparação com as possíveis reduções de impactos ambientais quando utiliza-se a borracha de pneus em asfaltos. Além disso, como mencionado por (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008), existe um grande interesse industrial na utilização de pneus como

substitutos dos combustíveis em cimenteiras e, apesar de parecer um ponto de interesse comercial e ambiental, (FERALDI *et al.*, 2013) concluiu que os impactos poderiam ser ainda mais reduzidos através da reciclagem, pois através da comparação de cenários, notou-se que os benefícios da fabricação do asfalto ecológico superam a substituição de combustíveis convencionais em fornos de cimento (FERALDI *et al.*, 2013; LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008).

Por fim, com o objetivo de mostrar a validade do estudo anterior, utiliza-se do relatório de ACV realizado pela *Asphalt Institute* (WILDNAUER *et al.*, 2019) para complementar a análise proposta. Os autores se propuseram a analisar CAP e CAP-m com SBS, PPA e borracha de pneu. Em todos os casos, considerando todas as linhas de produção, verificou-se que a extração de petróleo bruto foi a principal causadora dos impactos ambientais (aquecimento global, consumo de energia primária, acidificação do solo e água, consumo de água doce, consumo de combustível fóssil, entre outros) – o que é causado majoritariamente pela presença de torres de destilação, as quais são utilizadas para evaporar frações mais leves do petróleo (WILDNAUER *et al.*, 2019). Dessa forma, quando se utiliza uma fração maior de modificador, conseqüentemente a quantidade de betume necessária para produção de CAP-m é reduzida, resultando em um menor impacto, principalmente no consumo de combustíveis fósseis e mudanças climáticas, para todo o sistema mencionado por WILDNAUER *et al.* (2019) – argumentação referida no tópico 2.4.

Através de todos os estudos que fundamentam a fabricação do asfalto ecológico, visando a redução do número de pneus inservíveis que são destinados aos aterros e incineradores – conseqüentemente a redução dos impactos ambientais –, o trabalho aqui apresentado teve por objetivo realizar uma ACV comparativa e regionalizada da produção do pneu, do CAP e do asfalto ecológico, a fim de verificar se os resultados obtidos apresentam coerência com a literatura aqui revisada.

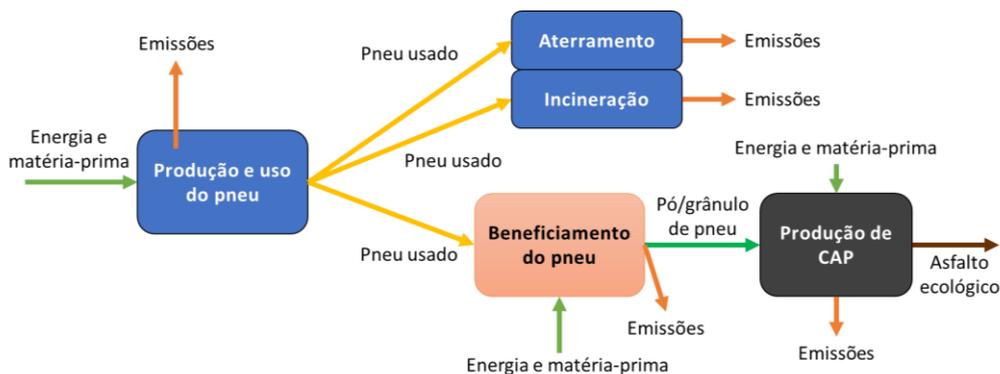
## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para um melhor embasamento sobre a viabilidade ambiental da utilização do asfalto ecológico, a ACV foi realizada utilizando o software *openLCA* (versão 1.10.3) – um programa gratuito e de código aberto. Utilizou-se também o banco de dados *Environmental Footprint (EF database – Versão do Nexus: 4)*, um projeto da Comissão Europeia realizado pela *ecoinvent* (ECOINVENT, 2019).

### 4.1. Objetivo e escopo da ACV

A ACV neste trabalho teve por objetivo verificar os diferentes impactos ambientais envolvidos na fabricação, uso e descarte do pneu, tendo em mente variações de acordo com o método de tratamento de fim de vida útil utilizado. Ademais, propôs verificar se a utilização do produto em questão como matéria-prima no CAP poderia reduzir os indicadores de impactos ambientais. Tais motivações estão observadas em estudos realizados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2016, 2021) e BERNUCCI et al. (2008), os quais indicam que novas tecnologias na área de pavimentação são necessárias para diminuir o aporte financeiro requerido para realizar as manutenções das malhas viárias, havendo ainda, em paralelo, a problemática de destinação correta para os pneus em desusos (FERALDI *et al.*, 2013).

Dividiu-se o escopo da ACV em três partes: (1) sistema de produto; (2) unidade funcional; e (3) fronteiras. O item (1) pode ser definido como o conjunto de processos que compõem a ACV; no estudo em questão foram elaborados cinco sistemas, os quais consideram a fabricação do pneu com três destinos diferentes, a produção do CAP e do asfalto ecológico. Assim, com o auxílio da Figura 9, percebe-se as opções presentes na ACV em questão. É importante ressaltar que o modelo descrito não considera uma destinação múltipla para os pneus, ou seja, para cada sistema há um único fim: aterro sanitário (sistema A – Figura 10), incineração (sistema B – Figura 11) e reciclagem mecânica (sistema C – Figura 12).



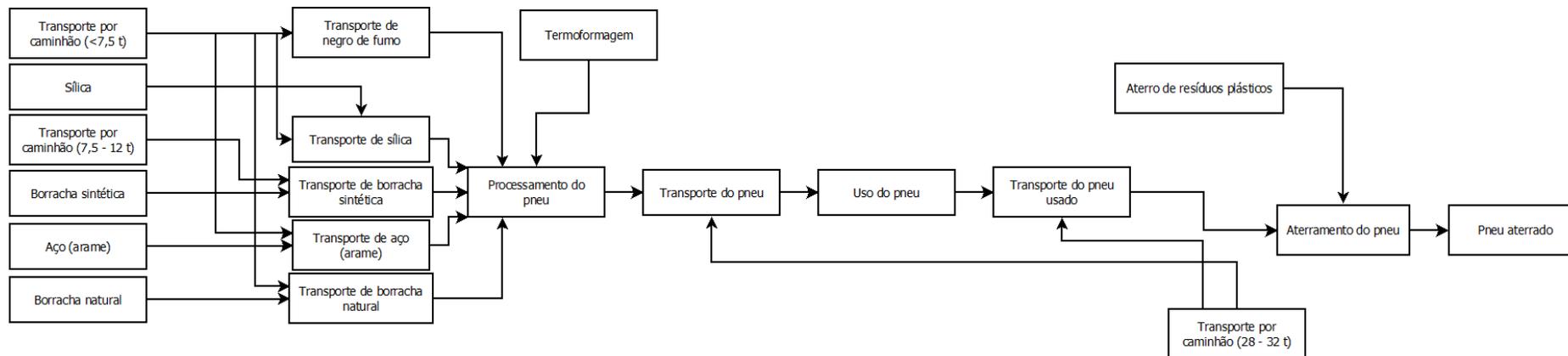
**Figura 9** - Esquematização simplificada dos sistemas de produtos, mostrando através das setas amarelas as possíveis destinações dos pneus usados/inservíveis. Fonte: autoria própria.

A fase comum nos sistemas A, B e C está associada à fabricação dos pneus. Sua produção se inicia com a fabricação e transporte rodoviário das matérias primas: NR, SBR, aço (armação na forma de arames), NF e sílica. Em seguida, todas as matérias-primas passam pelo processamento e conformação dos pneus, utilizando-se de um processo de moldagem por compressão – referido como termoformagem no software. Assim, realiza-se o transporte rodoviário do pneu recém-fabricado para as lojas vendedoras. A última etapa é composta do uso, destinação e transporte do pneu usado. Nesse ponto tem-se variações significativas nos sistemas, onde o produto é destinado ao aterro (sistema A) – resultando em pneu aterrado, Figura 10 –, incineração (sistema B), Figura 11 – resultando em resíduos de incineração e energia –, e moagem (sistema C), Figura 12 – resultando pneu moído. Os sistemas D (Figura 13) e E (Figura 14) também apresentam semelhanças, pois ambos englobam a produção de asfalto. O sistema de produto do CAP (sistema D) é iniciado pela produção e transporte de matéria prima até a usina asfáltica; nessa etapa, utilizando o inventário de WILDNAUER *et al.* (2019), considerou-se apenas o transporte rodoviário do betume, visto que os demais itens – água, gás natural e gás liquefeito de petróleo –, são transportados por tubulações. Assim, tendo todas as entradas presentes na usina asfáltica, inicia-se o beneficiamento do CAP, tendo o mesmo como produto de saída. Por fim, o sistema E (Figura 14) é formado pela conexão do produto gerado pelo sistema C (Figura 12) e o início do sistema D (Figura 13), sendo mais claro de avaliar através da Figura 14; como é visto no diagrama apresentado do sistema E, as regiões de linhas pretas representam o sistema de

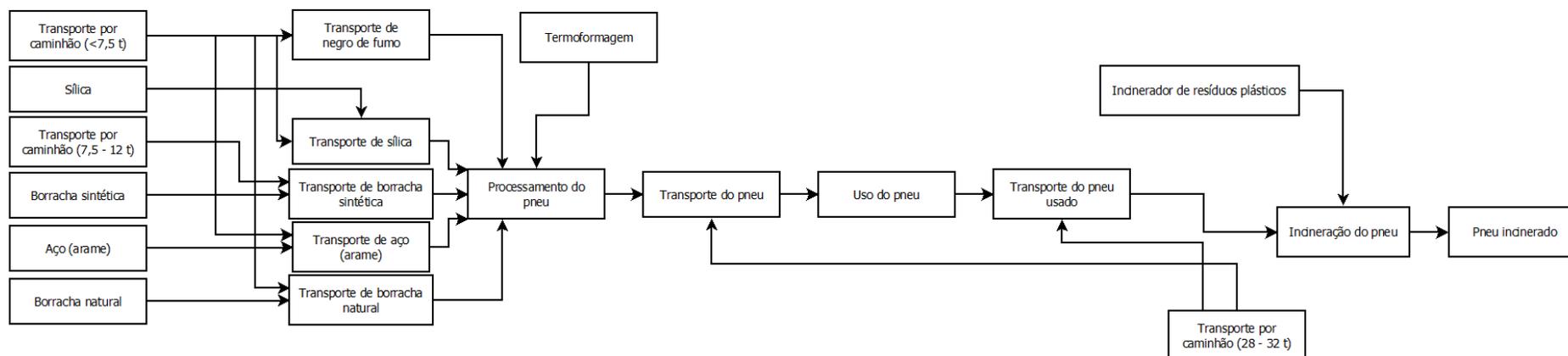
produto do pneu que considera a reciclagem mecânica; o pó de pneu obtido desse processo é inserido no sistema de produto do CAP como matéria prima, substituindo uma fração de betume; já as linhas azuis representam a cadeia produtiva do CAP. Dessa forma, pode-se analisar o efeito da utilização do pneu na fabricação de asfalto ecológico (BERNUCCI *et al.*, 2008; WILDNAUER *et al.*, 2019). Ao final desse subtópico estão apresentados os sistemas A, B, C, D e E – esquematizando o detalhamento utilizado no software *openLCA* (Figura 10 - 14).

Agora, considerando a etapa (2) do escopo: a unidade funcional. No estudo em questão estabeleceu-se uma limitação em função de um caminhão que será utilizado no transporte dos pneus – o que resultou em aproximadamente 4.500 pneus por caminhão. Apesar disso, como trata-se de um estudo comparativo de um volume fixo do mesmo produto, o fluxo de referência de cada produto será o mesmo, resultando em uma comparação coerente. Além disso, a unidade funcional do CAP foi realizada a fim de resultar uma concentração de 20% em massa de pó de pneu, o que se trata de um valor mínimo estipulado pela ASTM (2019). Assim, a massa de CAP-m feito com 20% de pó de borracha, fabricado a partir de 4.500 pneus, é 127.125 kg – sendo essa a unidade funcional.

Por fim, considerando a parte (3) do escopo, definiu-se as fronteiras; nesse contexto dividiu-se em duas fronteiras: referente a produção do pneu sendo do berço ao túmulo; referente a produção de CAP sendo do berço ao portão. Essa diferenciação é realizada devido ao tipo de análise proposto, pois a comparação será entre os tipos de tratamentos dados aos pneus inservíveis e, além disso, em relação ao CAP, a análise pode ser efetuada até o momento em que se obtém o asfalto ecológico, pois a vida útil do asfalto está associada com a solicitação de tráfego e às condições climáticas da região, o que é considerado um complicador para determinar o túmulo do material (BERNUCCI *et al.*, 2008).

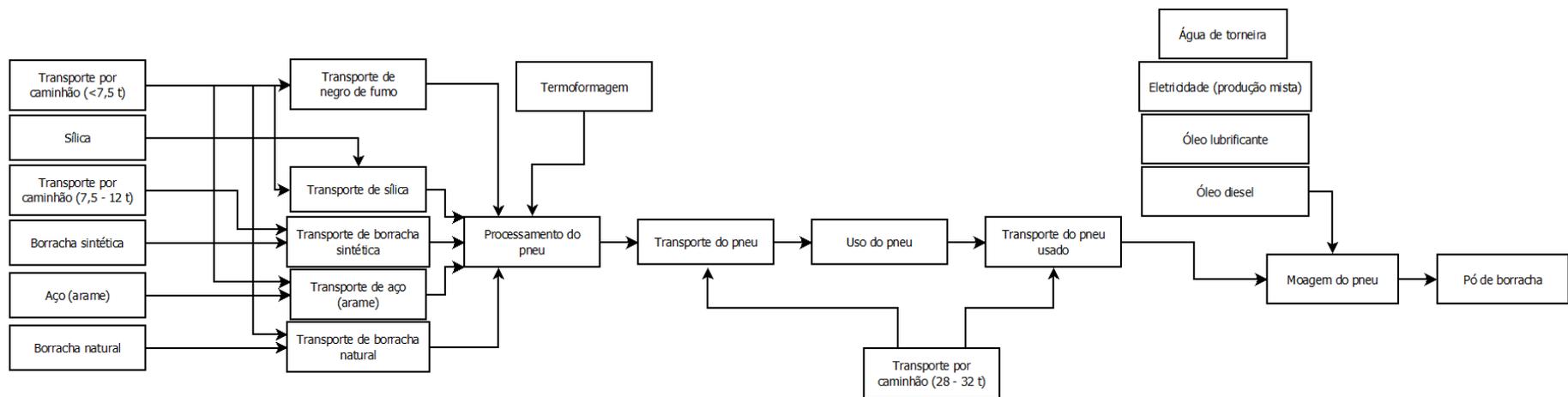


**Figura 10** - Sistema A: ciclo de vida do pneu com destino ao aterramento. Fonte: autoria própria.

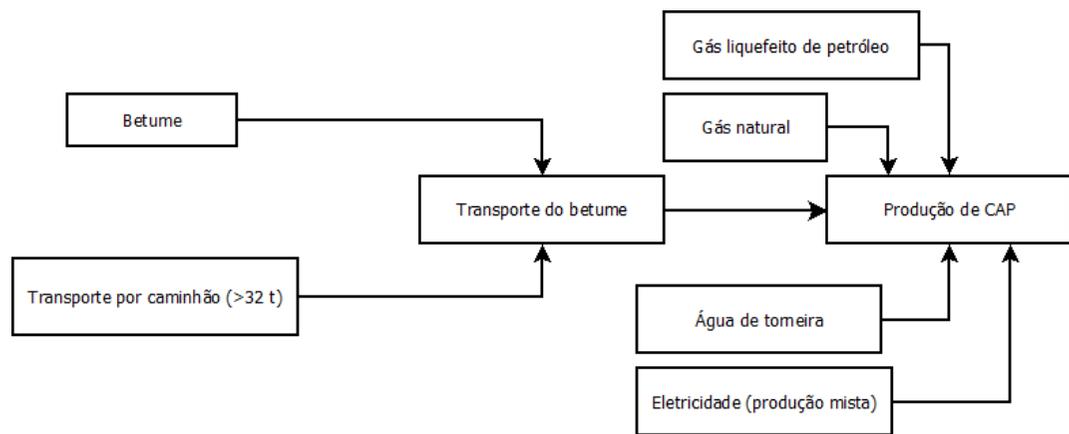


\* O processo de incineração utilizado não é específico para borrachas, sendo desenvolvido para materiais poliméricos e papel

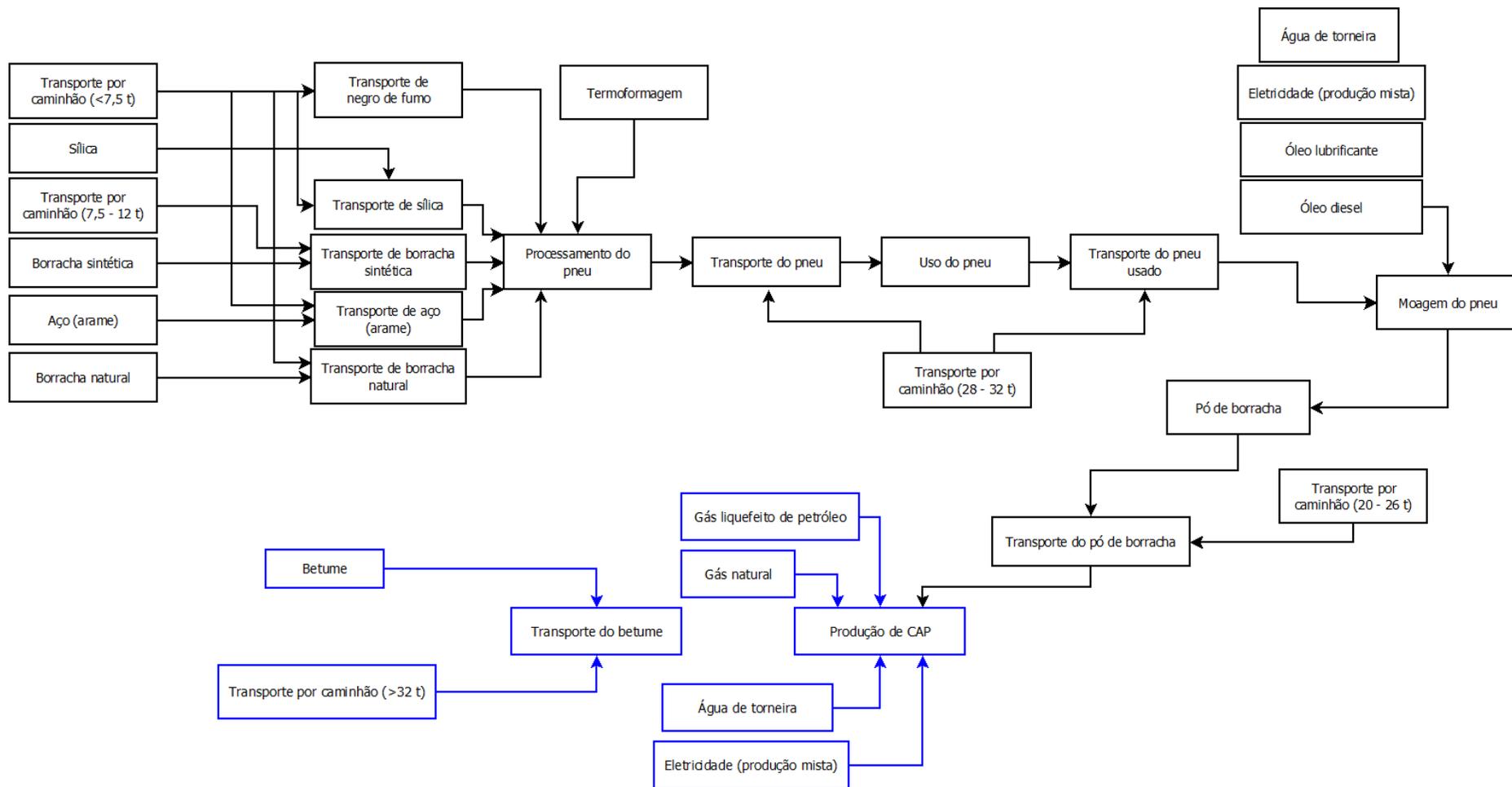
**Figura 11** - Sistema B: ciclo de vida do pneu com destino à incineração



**Figura 12 - Sistema C: ciclo de vida do pneu com destino à reciclagem mecânica.** Fonte: autoria própria.



**Figura 13 - Sistema D: produção do CAP (berço ao portão).** Fonte: autoria própria.



**Figura 14** - Sistema E: produção do asfalto ecológico (20% de pó de pneu). Fonte: autoria própria.

## 4.2. Inventário do Ciclo de vida (ICV)

O ICV, como definido pelas normas técnicas utilizadas (ABNT, 2009a, b), são conjuntos de informações quantitativas sobre os fluxos de entrada e saída na ACV. As tabelas abaixo ( Tabela 3 - 9) apresentam todas as entradas e saídas dos ICVs inseridos no software *openLCA*, as quais foram baseados em trabalhos anteriores (BRAS; COBERT, 2011; BRESSI *et al.*, 2021; COBERT, 2009; DONG *et al.*, 2021; FARINA *et al.*, 2017; FERALDI *et al.*, 2013; SUN *et al.*, 2016a; WILDNAUER *et al.*, 2019), realizando simplificações de acordo com as limitações do banco de dados utilizado. Logo, a composição de um pneu foi definida por 1,93 kg de SBR, 1,45 kg de NR, 0,89 kg de aço, o qual foi utilizado na armação metálica, 1,50 kg de NF e 0,77 kg de sílica, os quais constituem os principais aditivos dos elastômeros utilizados. Mesmo que se trate de uma simplificação do produto real, os inventários de matérias-primas presentes na literatura apresentam diversas desconsiderações, sendo aceitável, visto as limitações de cada trabalho. Além disso, como os pneus apresentam massas distintas, o que varia de acordo com o tipo de pneu e fabricante (BRAS; COBERT, 2011; COBERT, 2009; DONG *et al.*, 2021), as massas foram estipuladas baseando-se em uma média do percentual de cada matéria-prima, visando a produção de um pneu leve de 6,54 kg – utilizado em carros de passeio.

É importante ressaltar que todo o transporte foi regionalizado de acordo com a Tabela 10, tratando-se de um modelamento fictício, tomando como embasamento as empresas de matérias-primas mais próximas à *Pirelli*, sendo ela a fabricante do produto adotada no estudo. Após a fabricação, considerou-se um transporte até uma loja *Pirelli* localizada em Bauru/SP – sendo esse o ponto de saída para os pneus usados. Já em relação ao transporte do betume, referenciou-se a refinaria Replan, pois está mais perto da usina de asfalto utilizada no modelamento: SP Pavimentação e Terraplanagem. Por fim, a reciclagem mecânica foi realizada na Utep, escolhida pela proximidade da usina de asfalto; já a incineração foi realizada na fábrica de cimento Votorantim (Santa Helena), escolhida também pela distância.

**Tabela 3 - ICV dos processos de transporte de matéria prima e processamento do pneu. Fonte: autoria própria.**

	Entrada	Quantidade	Unidade funcional (× 4.500 unidades)
Transporte de matéria-prima	NR	1,45 kg	6.525 kg
	SBR	1,93 kg	8.685 kg
	Aço (arame)	0,89 kg	4.005 kg
	NF	1,50 kg	6.750 kg
	Sílica	0,77 kg	3.465 kg
	Transporte de NR	487 km × 1,45 kg	487 km × 6.525 kg
	Transporte de SBR	4,6 km × 1,93 kg	4,6 km × 8.685 kg
	Transporte de aço (arame)	41,8 km × 0,89 kg	41,8 km × 4.005 kg
	Transporte de NF	59,9 km × 1,50 kg	59,9 km × 6.750 kg
	Transporte de sílica	60,1 km × 0,77 kg	60,1 km × 3.465 kg
Processamento e conformação do pneu	Termoformagem (produção mista)	6,54 kg	29.430 kg
Saída			
	Pneu	6,54 kg	29.430 kg

**Tabela 4 - ICV do processo de transporte do pneu. Fonte: autoria própria.**

	Entrada	Quantidade	Unidade funcional (× 4.500 unidades)
Transporte do pneu	Pneu	6,54 kg	29.430 kg
	Transporte do pneu	353 km × 6,54 kg	353 km × 29.430 kg
Uso de pneu			
Saída			
	Pneu usado	6,54 kg	29.430 kg

**Tabela 5 - ICV dos processos de transporte do pneu usado e sua disposição final em aterro sanitário. Fonte: autoria própria.**

	Entrada	Quantidade	Unidade funcional (× 4.500 unidades)
Aterramento do pneu	Pneu usado	6,54 kg	29.430 kg
	Transporte do pneu usado	15,6 km × 6,54 kg	15,6 km × 29.430 kg
	Aterramento do pneu usado	6,54 kg	29.430 kg
Saída			
	Pneu aterrado	6,54 kg	29.430 kg

**Tabela 6** - ICV dos processos de transporte do pneu usado e sua disposição final por incineração. Fonte: autoria própria.

	Entrada	Quantidade	Unidade funcional (× 4.500 unidades)
Incineração do pneu	Pneu usado	6,54 kg	29.430 kg
	Transporte do pneu usado	331 km × 6,54 kg	331 km × 29.430 kg
	Incineração do pneu usado	5,65 kg	25.425 kg
<b>Saída</b>			
	Pneu incinerado	5,65 kg	25.425 kg
	Aço não incinerado	0,89 kg	4.005 kg

**Tabela 7** - ICV dos processos de transporte e reciclagem mecânica do pneu usado. Fonte: autoria própria.

	Entrada	Quantidade	Unidade funcional (× 4.500 unidades)
Reciclagem mecânica do pneu	Pneu usado	6,54 kg	29.430 kg
	Transporte do pneu usado	331 km × 6,54 kg	331 km × 29.430 kg
	Eletricidade	2,51 kWh	11.295 kWh
	Água	0,0014 m <sup>3</sup>	6,3 m <sup>3</sup>
	Óleo lubrificante	0,0003 kg	1,35 kg
	Metal (lamina)	0,002 kg	9 kg
	Diesel	0,02 kg	90 kg
<b>Saída</b>			
	Granulos/pó de pneu	5,65 kg	25.425 kg

**Tabela 8** - ICV de produção do CAP. Fonte: autoria própria.

Produção de CAP		
Entrada	Quantidade	Unidade funcional (127.125 kg)
Betume	1,0 kg	127.125 kg
Eletricidade	0,14 MJ	17.162 MJ
Gás liquefeito de petróleo	0,00017 MJ	21 MJ
Gás natural	1,04 MJ	132.210 MJ
Água	0,299 kg	38.014 kg
<b>Saída</b>		
CAP	1,0 kg	127.125 kg

**Tabela 9** - ICV de produção do asfalto ecológico. Fonte: autoria própria.

Produção de asfalto ecológico		
Entrada	Quantidade	Unidade funcional (127.125 kg)
Betume	0,80 kg	101.700 kg
Granulos/pó de borracha	0,20 kg	25.425 kg
Eletricidade	0,14 MJ	17.162 MJ
Gás liquefeito de petróleo	0,00017 MJ	21 MJ
Gás natural	1,04 MJ	132.210 MJ
Água	0,299 kg	38.014 kg
<b>Saída</b>		
Asfalto ecológico	1,0 kg	127.125 kg

**Tabela 10** - Detalhes sobre a regionalização realizada nas etapas de transporte. Fonte: autoria própria.

	Material/Produto	Partida	Destino	Distância
Transporte de matéria-prima	NR	Poloni/SP: Hevea-Tec	Santo André/SP: Pirelli	487 km
	SBR	Santo André/SP: Braskem	Santo André/SP: Pirelli	4,6 km
	Aço (arame)	Osasco/SP: Bakaert	Santo André/SP: Pirelli	41,8 km
	NF	Cubatão/SP: Birla Carbon	Santo André/SP: Pirelli	59,9 km
	Sílica	Santana de Parnaíba/SP: Novakem	Santo André/SP: Pirelli	60,1 km
Transporte do pneu	Pneu	Santo André/SP: Pirelli	Bauru/SP: Pirelli (loja)	353 km
Transporte do pneu usado (aterro)	Pneu usado	Bauru/SP: Ecoponto Sorocabana	Bauru/SP: Aterro Sanitário de Bauru	15,6 km
Transporte do pneu usado (incineração)	Pneu usado	Bauru/SP: Ecoponto Sorocabana	Votorantim/SP: Votorantim	279 km
Transporte do pneu usado (moagem)	Pneu usado	Bauru/SP: Ecoponto Sorocabana	Guarulhos/SP: Utep	348 km
Transporte do pneu moído	Pneu moído	Guarulhos/SP: Utep	São Paulo/SP: SP Pavimentação e Terraplanagem	8,4 km
Transporte de betume	Betume	Paulínia/SP: REPLAN	São Paulo/SP: SP Pavimentação e Terraplanagem	147 km

### 4.3. Avaliação de Impactos Ambientais

Os cálculos dos indicadores de impacto ambiental foram realizados utilizando o modelo ambiental *Environmental Footprint (Mid-point indicator)*. Pautando-se nas normas ISO (ABNT, 2009a, b) e nas análises presentes na literatura (FERALDI *et al.*, 2013; PIOTROWSKA *et al.*, 2019), os impactos foram escolhidos a fim de abranger mudanças climáticas, riscos à saúde humana e consumo de recursos naturais. Dessa forma, as categorias de impacto escolhidas estão presentes na Tabela 11.

**Tabela 11** - Categorias de impacto escolhidas para análise. Fonte: autoria própria.

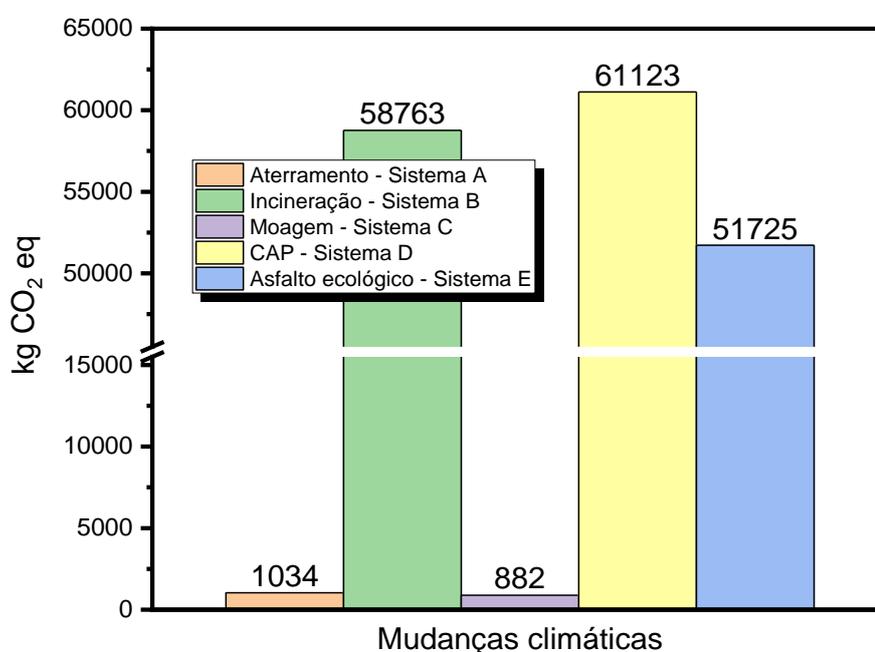
Categoria de impacto	Unidade de referência
Mudanças climáticas	kg CO <sub>2</sub> eq
Ecotoxicidade da água doce	CTUh*
Toxicidade humana (cancerígeno)	CTUh
Toxicidade humana (não-cancerígeno)	CTUh
Consumo de combustíveis fósseis	MJ
Consumo de água	m <sup>3</sup>

\* Unidade tóxica comparativa para humanos

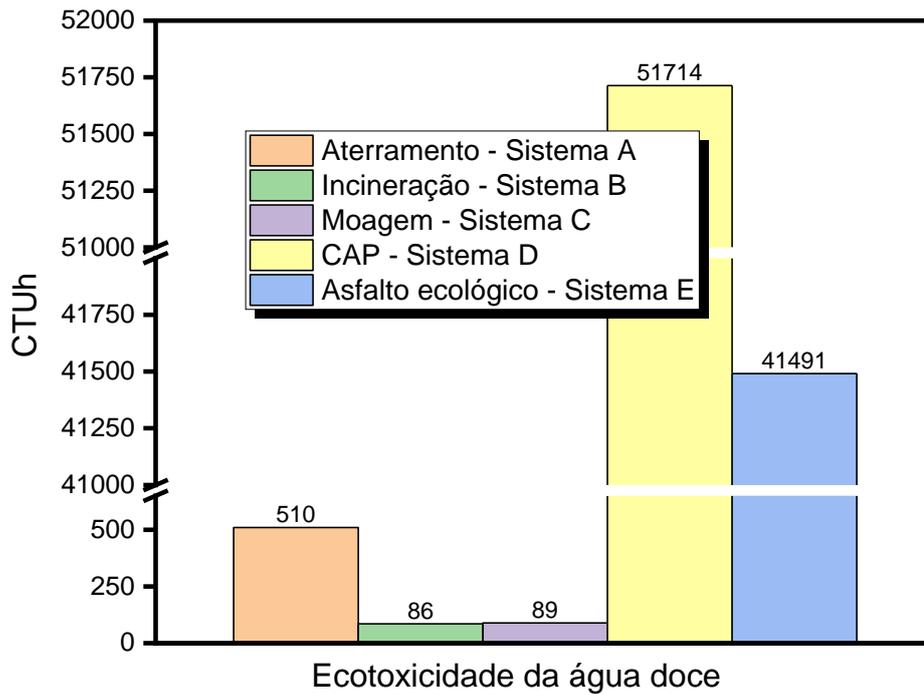
Um ponto a ser considerado através dessas análises é a limitação de provedores presentes no software, pois não há opções brasileiras – o que traz discrepâncias em consideração ao cenário brasileiro.

## 5. RESULTADOS

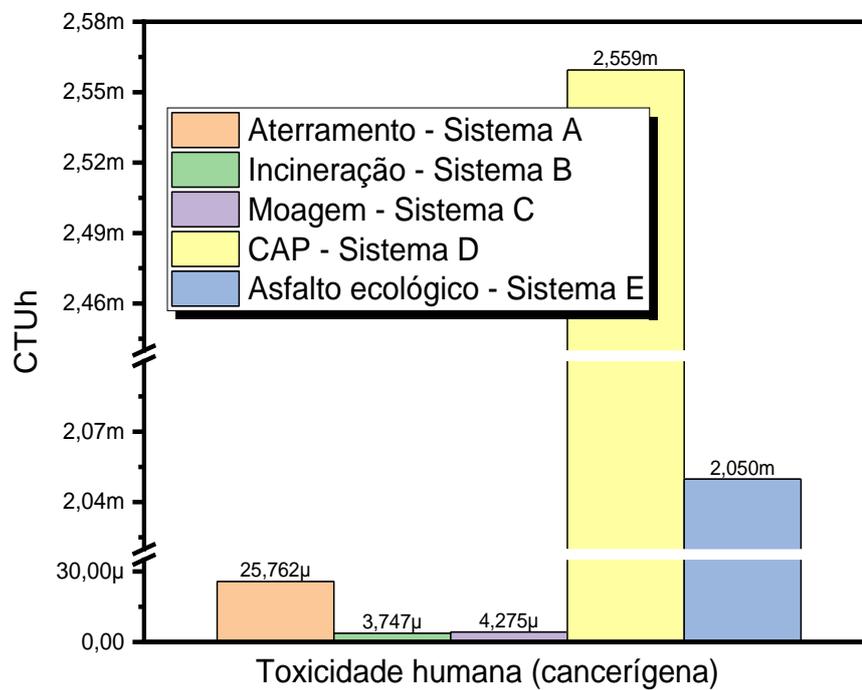
Os gráficos a seguir (Figura 10 - 15) apresentam os indicadores de impacto ambiental para cada categoria referentes aos sistemas A, B, C, D e E. Além dos resultados obtidos para cada categoria de impacto, foi possível obter o percentual de impacto de cada processo, os quais são referentes aos seus respectivos sistemas (Tabela 12) – descartando os quais não contribuem expressivamente. A legenda dos gráficos contém a característica principal do sistema e sua identificação.



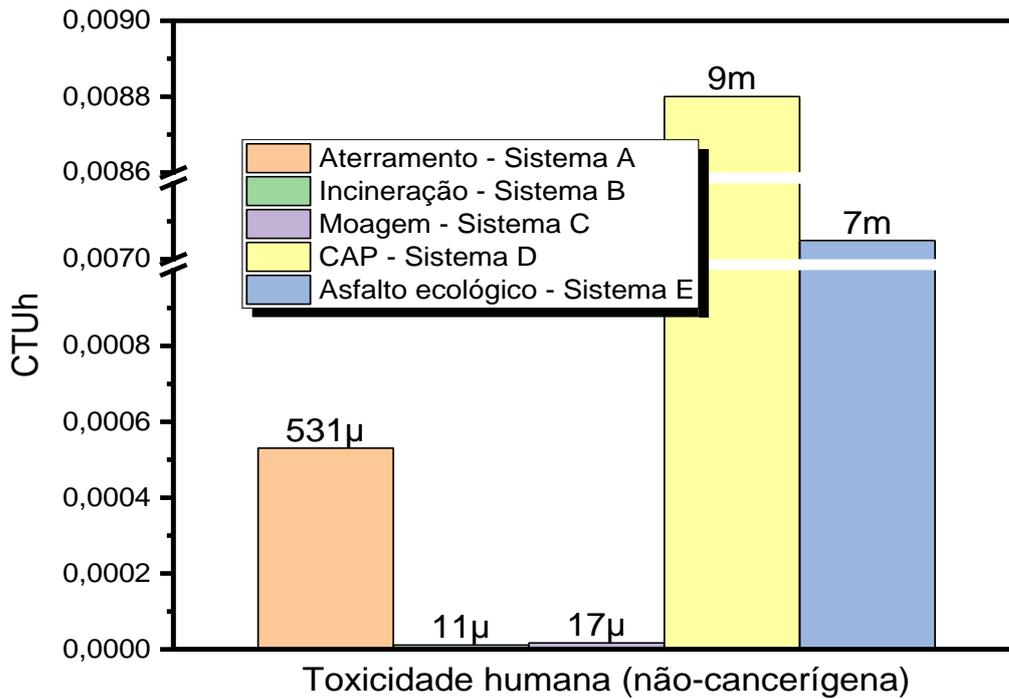
**Figura 15** - Resultados dos indicadores referentes à categoria mudança climática. Fonte: autoria própria.



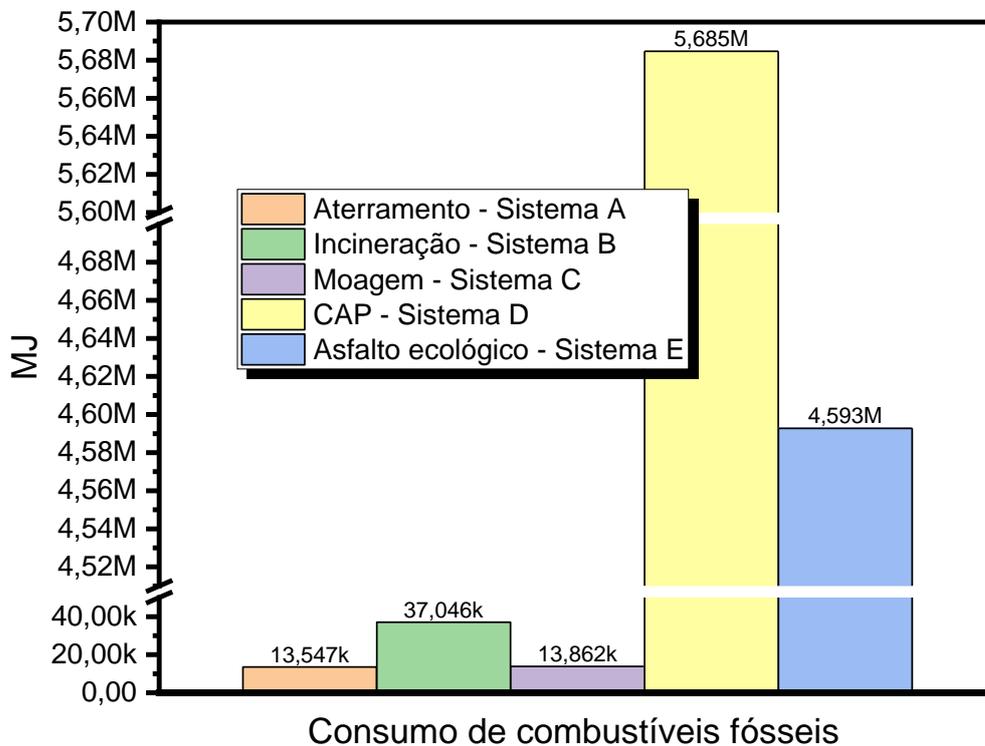
**Figura 16** - Resultados dos indicadores referentes à categoria ecotoxicidade da água doce. Fonte: autoria própria.



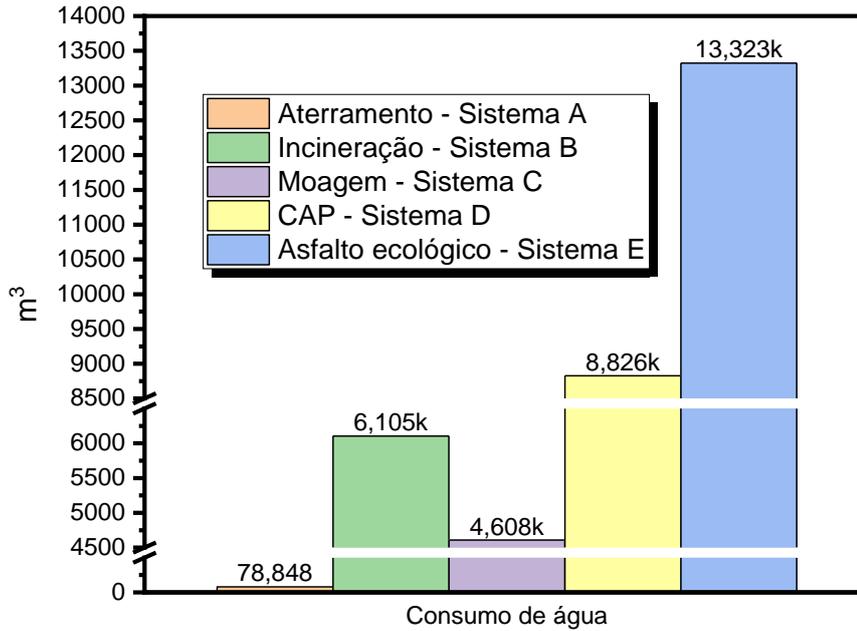
**Figura 17** - Resultados dos indicadores referentes à categoria toxicidade em humanos (cancerígeno). Fonte: autoria própria.



**Figura 18** - Resultados dos indicadores referentes à categoria toxicidade em humana (não-cancerígeno). Fonte: autoria própria.



**Figura 19** - Resultados dos indicadores referentes à categoria consumo de combustíveis fósseis. Fonte: autoria própria.



**Figura 20** - Resultados dos indicadores referentes à categoria consumo de água.  
Fonte: autoria própria.

**Tabela 12** - Percentuais de impactos referentes aos processos de cada sistema.  
Fonte: autoria própria

	Sistema A	Sistema B		Sistema C		
	Aterramento	Incineração	Transporte (28 - 32 t)	Produção de diesel	Transporte (28 - 32 t)	Eletricidade (hidroelétrica)
Toxicidade humana (cancerígeno)	100%	51%	48%	50%	42%	< 1%
Ecotoxicidade da água doce	99%	53%	44%	49%	43%	< 1%
Mudanças climáticas	97%	99%	1%	5%	73%	19%
Consumo de recursos fósseis	96%	76%	24%	33%	63%	< 1%
Toxicidade humana (não-cancerígeno)	100%	35%	61%	43%	40%	4%
Consumo de água	99%	99%	< 1%	< 1%	< 1%	94%

	Sistema D				Sistema E			
	Produção de betume	Gás natural	Eletricidade (hidroelétrica)	Água da torneira	Produção de betume	Gás natural	Água da torneira	Eletricidade (hidroelétrica)
Toxicidade humana (cancerígeno)	99%	< 1%	< 1%	< 1%	99%	< 1%	< 1%	< 1%
Ecotoxicidade da água doce	99%	< 1%	< 1%	< 1%	99%	< 1%	< 1%	< 1%
Mudanças climáticas	83%	15%	< 1%	< 1%	78%	18%	< 1%	< 1%
Consumo de recursos fósseis	97%	2%	< 1%	< 1%	96%	3%	< 1%	< 1%
Toxicidade humana (não-cancerígeno)	99%	< 1%	< 1%	< 1%	99%	< 1%	< 1%	< 1%
Consumo de água	6%	< 1%	75%	18%	3%	< 1%	14%	82%

A Tabela 12, disposta acima, ilustra os principais percentuais de impacto ambiental de cada processo, os quais são referentes ao impacto total causado por cada sistema. Isso é necessário para deixar claro quais processos são os mais impactantes em cada sistema.

## **6. DISCUSSÃO**

Utilizando os dados apresentados no tópico anterior (Figura 15 - 15 e Tabela 12), pode-se dividir as discussões dos resultados em função da categoria de impacto analisada e observar quais processos foram mais impactantes para esses sistemas.

### **6.1. Mudanças climáticas**

Analisando o primeiro resultado apresentado (Figura 15), nota-se que os sistemas que detiveram menores impactos nas mudanças climáticas – o que é medido pelo quilograma equivalente do dióxido de carbono (kg CO<sub>2</sub> eq) – foram os sistemas A e C, os quais correspondem ao ciclo de vida do pneu com destino final em aterro sanitário e reciclagem mecânica (definido pelo processo de moagem), respectivamente. Por outro lado, a emissão de GEE na atmosfera foi entre 51 e 61 vezes maior nos sistemas B, D e E, os quais correspondem ao ciclo de vida do pneu com destino a incineração, produção de CAP e produção de asfalto ecológico, respectivamente. Dentre todos os apresentados, o que apresenta o menor impacto é a reciclagem mecânica (moagem), porém similar ao descarte em aterro sanitário.

No geral, percebe-se que os impactos do ciclo de vida do asfalto convencional (sistema D) estão presentes no processo de produção de betume (Tabela 12), o que é justificado pela queima de combustíveis, resultando na emissão de gases na atmosfera – como é o caso das torres de destilação utilizadas na separação do petróleo. É interessante notar que na produção de asfalto ecológico ocorre a redução em 20% de betume, o qual é substituído por borracha de pneu; o impacto devido a essa substituição também é diminuído, em aproximadamente 15% – não sendo maior pela presença da queima de gás natural em ambos os sistemas (D e E).

## **6.2. Ecotoxicidade da água doce**

Através dos dados obtidos da ACV, constata-se que os sistemas que mais afetam a ecotoxicidade da água doce são os que envolvem a produção de betume, pois, como observado na Tabela 12, esse é o processo menos saudável nessa categoria de impacto.

Abordando com mais detalhes, nota-se que durante a etapa de produção do CAP e do asfalto ecológico ocorre a emissão de diversos metais pesados e tóxicos em águas doces, como Cromo (Cr), Arsênio (As), Cobre (Cu), Bário (Ba), Níquel (Ni), Cádmio (Cd) e Vanádio (V). Como essa realidade está associada de forma majoritária com a produção de betume, observa-se uma diminuição de aproximadamente 20% dos índices de CTUh quando se utiliza o asfalto ecológico, mostrando uma grande vantagem na substituição de betume por borracha reciclada mecanicamente.

## **6.3. Toxicidade humana (cancerígena)**

Novamente os sistemas D e E apresentam uma forte influência nessa categoria de impacto, o que não é observado na ausência de produção asfáltica (A, B e C) – vide Figura 17. No grupo A/B/C, observando os dados da Tabela 12, nota-se que os principais causadores dessa problemática são os métodos de tratamento utilizados no pneu inservível e o transporte do produto – os quais são, novamente, diluídos quando comparados com a cadeia produtiva do asfalto. Analisando os dados referentes aos sistemas D e E, verifica-se que o processo para obtenção do betume é sobressaído, sendo capaz de diluir tanto os demais processos ao ponto de deter aproximadamente 100% de todo o impacto causado nessa categoria – em ambos os sistemas. Entretanto, como visto anteriormente, a borracha reciclada pode mitigar os efeitos do processo; quando se adiciona 20% desse material na composição do CAP ocorre a diminuição da emissão de químicos carcinogênicos na mesma proporção, ou seja, reduz-se em 20%.

## **6.4. Toxicidade humana (não-cancerígena)**

Analisando a Figura 18, verifica-se que, assim como nas categorias anteriores, os processos que envolvem a produção asfáltica apresentam os maiores indicadores de impacto. O sistema A, referente ao aterro sanitário, foi o mais prejudicial nessa

categoria – considerando as cadeias sem produção asfáltica. Por outro lado, os sistemas B e C, quando comprados aos demais, obtiveram emissões diminutas de químicos prejudiciais não-cancerígenos, mostrando-se os processos mais adequados para essa categoria. Em relação aos sistemas D e E, os quais envolvem a produção de CAP, novamente o processo de obtenção de betume é o responsável pela diluição dos efeitos de todo o sistema, fazendo com que 99% da emissão de químicos tóxicos não-cancerígenos seja proveniente dessa etapa (Tabela 12). Por essa razão, observa-se a mesma situação das categorias anteriores: quando se realiza a produção de asfalto ecológico, substituindo 20% do betume para produção de CAP por borracha de pneu, o CTUh dessa categoria diminui em 22% – mostrando coerência com a diminuição realizada, havendo uma variação pelo efeito de regionalização, visto que a reciclagem mecânica ocorre mais perto da empresa de pavimentação em comparação com a refinaria de petróleo (vide Tabela 10).

### **6.5. Consumo de combustíveis fósseis**

Avaliando agora as categorias que envolvem o consumo de recursos naturais, iniciando pela origem fóssil – sendo medida pela energia (MJ) liberada na queima desses combustíveis. Nota-se mais uma vez indicadores exacerbados nos sistemas de produção asfáltica (D e E), tornando o consumo de A, B e C diminutos quando se realiza a comparação. Desconsiderando os sistemas de produção de CAP e asfalto ecológico, nota-se que as variações apresentadas são provenientes da modelagem de transporte realizada (vide Tabela 10 e Tabela 12), havendo diferenças entre as distâncias percorridas para cada sistema. Já em relação aos sistemas D e E, a produção de betume detém a maior contribuição para o índice de consumo dos combustíveis fósseis – visto a utilização de petróleo e gás natural na sua obtenção. Como já foi observado em outras categorias, quando realiza-se a produção de asfalto ecológico com 20% de borracha, ocorre a diminuição de betume na mesma proporção. Logo, por meio da Figura 19, verifica-se uma diminuição de 19% da utilização de combustíveis fósseis do sistema D para o sistema E, sendo de acordo com o modelamento de ACV realizado.

## 6.6. Consumo de água

Por fim, realizou-se a análise do consumo de água presente em cada sistema – o que é quantificado pelo volume de água consumido (m<sup>3</sup>). Nessa categoria, considerando apenas os sistemas de tratamento dos pneus inservíveis (A, B e C), percebe-se que o aterro sanitário é o que menos consome água, seguido da reciclagem mecânica (moagem) e incineração. A natureza do sistema A, como observado na Tabela 12, possui um consumo majoritário pelo aterro, o que não é elevado quando comparado à incineração presente no sistema B e ao consumo de água referente a hidroelétrica, o que é mostrado no sistema C. Dessa forma, percebe-se que nessa categoria o mais adequado é o aterro dos pneus inservíveis, pois não causaria um grande consumo de água.

Por outro lado, nos sistemas que apresentam fabricação asfáltica, vê-se que a produção de asfalto ecológico é a mais impactante quando comparada a produção de CAP – sendo justificado pela presença de reciclagem mecânica, a qual é utilizada para fazer o pó/granulo de borracha que é inserido na composição do asfalto. Como é ilustrado na Tabela 12, o principal contribuinte para esse impacto dentro do sistema E é a eletricidade proveniente da usina hidroelétrica, processo presente na moagem do pneu. É interessante notar que o volume de água utilizado no sistema E é aproximadamente a soma entre o volume consumido no sistema C e D (reciclagem mecânica e produção de CAP), mostrando que há a sobreposição dos impactos presentes em ambos os sistemas.

## 6.7. Resumo das discussões realizadas

Através de todas as comparações realizadas, pode-se resumir os resultados através da Tabela 13, dividindo em grupo A/B/C – tratamentos realizados em pneus inservíveis –, e grupo D/E – produção asfáltica –, uma divisão necessária pela natureza de cada sistema. Os símbolos são classificados deste modo: ✓ – menor impacto do grupo; ✗ – maior impacto do grupo; △ – impacto intermediário do grupo.

**Tabela 13** - Esquematização das comparações realizadas sobre cada processo.

Fonte: autoria própria.

	Sistema A	Sistema B	Sistema C	Sistema D	Sistema E
Toxicidade humana (cancerígeno)	X	✓	✓	X	✓
Ecotoxicidade da água doce	X	✓	✓	X	✓
Mudanças climáticas	✓	X	✓	X	✓
Consumo de combustíveis fósseis	✓	X	✓	X	✓
Toxicidade humana (não-cancerígeno)	X	✓	✓	X	✓
Consumo de água	✓	X	⚠	✓	X

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no presente trabalho apresentaram coerência com a literatura utilizada e trouxe novas visões pela ACV realizada. Tendo em mente todas as limitações e possíveis discrepâncias presentes no modelamento de ciclo de vida realizado, pôde-se chegar nas seguintes conclusões:

- Os efeitos de regionalização (transporte) só apresentaram impactos relevantes sobre os sistemas A, B e C. Quando houve produção asfáltica, a obtenção de betume diluiu os demais processos, tornando a regionalização uma etapa desnecessária para o modelamento do CAP e do asfalto ecológico, tendo um limite de estudo do tipo berço ao portão;
- Dentre os três destinos estudados para o pneu inservível, a reciclagem mecânica mostrou ser a escolha de menores indicadores de impactos ambientais, apresentando apenas um consumo de água intermediário aos demais sistemas (A e B);
- A principal vantagem de se utilizar o pneu inservível na fabricação do asfalto ecológico está na redução de betume necessária para fabricar o mesmo volume de CAP, visto que a contribuição desse processo é aproximadamente 100% na maioria das categorias estudadas – considerando os sistemas D e E;
- As reduções dos indicadores nos sistemas D e E ocorrem, aproximadamente, de forma proporcional a adição de borracha reciclada mecanicamente. Como foi observado, a maior parte das reduções variaram em torno de 20% – percentual de betume substituído;

- A principal desvantagem na fabricação do asfalto ecológico se encontra no maior consumo de água, o qual é proveniente do processo de moagem do pneu presente na reciclagem mecânica;
- Apesar do consumo de água apresentar um aumento no sistema E, verificou-se que todas as demais categorias de impacto foram mitigadas pela substituição de betume pela borracha de pneu moída. Além disso, quando se faz a produção do asfalto ecológico, naturalmente reduz-se o número de pneus que seriam descartados em aterros ou incinerados, o que reduz ainda mais os possíveis impactos desses sistemas;
- Por fim, presume-se que, como a literatura aponta o aumento de vida útil da pavimentação quando se utiliza o asfalto ecológico, os impactos ambientais apresentados podem ser menores devido a diminuição na necessidade de reparos a longo prazo.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípio e estrutura**. Rio de Janeiro/RJ, 2009a. Acesso em 13 de março de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro/RJ, 2009b. Acesso em 13 de março de 2022.

ARABANI, M.; TALEGHANI, M. Y. Rutting behavior of hot mix asphalt modified by polyvinyl chloride powder. **Petroleum Science and Technology**, vol. 35, no. 15, p. 1621–1626, 2017. <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1336772>. Acesso em 20 de março de 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM: 6164/D6164M-21 - Standard Specification for Styrene Butadiene Styrene (SBS) Modified Bituminous Sheet Materials Using Polyester Reinforcements**. 2021. DOI 10.1520/D6164\_D6164M-21. Acesso em 13 de março de 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM: D6114/D6114M-19 - Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder**. 2019. DOI 10.1520/D6114\_D6114M-19. Acesso em 13 de março de 2022.

BECKER, Y.; MÉNDEZ, M. P.; RODRÍGUEZ, Y. **Polymer Modified Asphalt**. 2001. Acesso em 25 de fevereiro de 2022

BERNUCCI, L. B.; DA MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**. 2008.

BOCKSTAL, L.; BERCHEM, T.; SCHMETZ, Q.; RICHEL, A. Devulcanisation and reclaiming of tires and rubber by physical and chemical processes: A review. **Journal of Cleaner Production**, vol. 236, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.049>. Acesso em 5 de março de 2022.

BOM DIA SP. **Pedidos de tapa-buracos crescem 23% em ano sem recapeamento na Capital**. 2022. Disponível em <https://globoplay.globo.com/v/10283903/>. Acesso em 20 de fevereiro de 2022.

BRAS, B.; COBERT, A. Life-Cycle Environmental Impact of Michelin Tweel® Tire for Passenger Vehicles. **SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems**, vol. 4, no. 1, p. 32–43, 2011. <https://doi.org/10.4271/2011-01-0093>. Acesso em 6 de março de 2022.

BRASIL. **Portaria nº 10/MT de 1993: Programa de Concessões de Rodovias Federais**. 1993.

BRESSI, S.; SANTOS, J.; OREŠKOVIĆ, M.; LOSA, M. A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment. **International Journal of Pavement Engineering**, vol. 22, no. 4, p. 524–538, 2021. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1623404>. Acesso em 14 de março de 2022.

BRYAN GARNIER & CO. **Tires & Rubber Products**. 2017. Acesso em 7 de março de 2022.

CANEVAROLO JR., S. v. **Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico Para Tecnólogos e Engenheirosengenheiros**. 3ª ed. São Paulo: Artliber, 2010.

CAVALCANTI, C. **Desenvolvimento e Natureza: Estudos para uma sociedade sustentável**. Recife/PE, 1994.

CHILINGARIAN, G. v; YEN, T. F. **Bitumens, Asphalts and Tar Sands (Developments in Petroleum Science)**. 7ª ed. Amsterdam: Elsevier, 1978.

CMMAD. **Nosso Futuro Comum (Relatório Brundtland)**. Rio de Janeiro, 1988.

CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2016: Relatório gerencial**. Brasília, 2016.

CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2021: Avaliação das condições das rodovias.** 20ª ed. Brasília 2021.

COBERT, A. **Environmental Comparison of Michelin Tweel™ and Pneumatic Tire Using Life Cycle Analysis.** 2009. Georgia, 2009. Acesso em 14 de março de 2022.

CONAMA. Resolução nº 316, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2005. Acesso em 23 de março de 2022.

DALY, W. H.; QIU, Z. **Differential Scanning Calorimetry Study of Asphalt Crystallinity.** 1996. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0361198196153500108>. Acesso em 4 de março de 2022.

ANDRADE, D.; PAULA, D. E. **Estado, sociedade civil e hegemonia do rodoviarismo no Brasil.** 2010. Acesso em 18 de março de 2022.

DONG, Y.; ZHAO, Y.; HOSSAIN, Md. U.; HE, Y.; LIU, P. Life cycle assessment of vehicle tires: A systematic review. **Cleaner Environmental Systems**, vol. 2, p. 100033, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100033>. Acesso em 25 de março de 2022.

DOS SANTOS, W. G.; DUVOISIN JUNIOR, S.; MACHADO, N. T. A Reciclagem de Pneus Inservíveis no Brasil nos Anos de 2009 a 2017. **EDUCAmazônia**, vol. 2, p. 572–584, 2020. Acesso em 22 de março de 2022.

EBOH, F. C. **Efficiency Improvements in Waste-to-Energy Combustion Processes: Method Development and Evaluation.** Borås, 2019. ORCID ID: 0000-0001-7478-3480. Acesso em 24 de fevereiro de 2022.

ECOINVENT. Environmental Footprint Database. **Comissão Europeia**, 2019. Acesso em 10 de fevereiro de 2022.

ERMAN, B.; MARK, J. E.; ROLAND, C. M. **The Science and Technology of Rubber**. 4ª ed. Elsevier, 2013. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05820-9>. Acesso em 8 de fevereiro de 2022.

ETESCO. **As características e benefícios do asfalto ecológico**. 2021. Disponível em <https://etesco.com.br/>. Acesso em 15 de fevereiro de 2022.

ETRA; RMA. **Scrap Tyre Recycling**. 2003. Acesso em 6 de fevereiro de 2022.

FARINA, A.; ZANETTI, M. C.; SANTAGATA, E.; BLENGINI, G. A. Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 117, p. 204–212, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.015>. Acesso em 21 de fevereiro de 2022.

FERALDI, R.; CASHMAN, S.; HUFF, M.; RAAHAUGE, L. Comparative LCA of treatment options for US scrap tires: Material recycling and tire-derived fuel combustion. **International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 18, no. 3, p. 613–625, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0514-8>. Acesso em 14 de fevereiro de 2022.

FRAGMAQ. Saiba como é feito o asfalto ecológico suas vantagens e desvantagens. 2016. Disponível em [www.fragmaq.com.br](http://www.fragmaq.com.br). Acesso em 15 de fevereiro de 2022.

GUO, F.; ZHANG, J.; PEI, J.; ZHOU, B.; FALCHETTO, A. C.; HU, Z. Investigating the interaction behavior between asphalt binder and rubber in rubber asphalt by molecular dynamics simulation. **Construction and Building Materials**, vol. 252, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118956>. Acesso em 11 de março de 2022.

HILGEMBERG, E. M.; GUILHOTO, J. J. M. Uso de combustíveis e emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto. **Nova Economia**, vol. 16, no. 1, p. 49–99, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0103-63512006000100002>. Acesso em 14 de março de 2022.

HURTUBIA, J. La evolucion del pensamiento ecológico. **América Latina del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente**. 1979.

HUY, T. A.; ADHIKARI, R.; LÜPKE, T.; MICHLER, G. H.; KNOLL, K. Investigation of morphology formation in SBS block copolymer/ homopolystyrene blends. **Polymer Engineering and Science**, vol. 44, no. 8, p. 1534–1542, 2004. <https://doi.org/10.1002/pen.20150>. Acesso em 10 de março de 2022.

INCHEM. **IPCS: Asphalt**. 2004. Disponível em <https://inchem.org/documents/icsc/icsc/eics0612.htm>. Acesso em 27 de fevereiro de 2022.

ITO, K. Novel entropic elasticity of polymeric materials: Why is slide-ring gel so soft. **Polymer Journal**, vol. 44, no. 1, p. 38–41, 2012. <https://doi.org/10.1038/pj.2011.85>. Acesso em 4 de março de 2022.

KARIM, H. H. Effect of Modified Asphalt with SBS Polymer on Mechanical properties of Recycled Pavement Mixture. **Global Journal of Engineering Science and Research Management**, vol. 5, no. 7, 2018. DOI 10.5281/zenodo.1326413. Acesso em 27 de março de 2022.

KINGPIN MARKET RESEARCH. **Global Truck and Bus Tires Market Report, History and Forecast 2015-2026, Breakdown Data by Manufacturers, Key Regions, Types and Application**. 2020. Acesso em 4 de fevereiro de 2022.

LABOY-NIEVES, E. N. Energy recovery from scrap tires: A sustainable option for small islands like Puerto Rico. **Sustainability (Switzerland)**, vol. 6, no. 5, p. 3105–3121, 2014. <https://doi.org/10.3390/su6053105>. Acesso em 18 de fevereiro de 2022.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. S. A. Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus no Brasil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 18, no. 2, p. 106–118, 2008. Acesso em 8 de março de 2022.

LIU, J.; YAN, K.; LIU, W.; ZHAO, X. Partially replacing Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) with other asphalt binder modifier: Feasibility study. **Construction and Building Materials**, vol. 249, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118752>. Acesso em 26 de fevereiro de 2022.

MAGALHÃES, L. G. A. **Desvulcanização de Resíduos de Borracha e sua Incorporação em Componentes de Calçado**. (dissertação: mestrado) Porto, 2015. Acesso em 9 de fevereiro de 2022.

NEJAD, F. M.; NAZARI, H.; NADERI, K.; KARIMIYAN KHOSROSHAHI, F.; HATEFI OSKUEI, M. Thermal and rheological properties of nanoparticle modified asphalt binder at low and intermediate temperature range. **Petroleum Science and Technology**, vol. 35, no. 7, p. 641–646, 2017. <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1276589>. Acesso em 20 de fevereiro de 2022.

NOTANI, M. A.; MOGHADAS NEJAD, F.; FINI, E. H.; HAJIKARIMI, P. Low-Temperature Performance of Toner-Modified Asphalt Binder. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, vol. 145, no. 3, p. 040190221–040190229, 2019. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000123>. Acesso em 18 de fevereiro de 2022.

PFA. **Use of Polyphosphoric Acid in Asphalt Binders**. Atlanta/Georgia: [s. n.], [s. d.]. Acesso em 8 de fevereiro de 2022.

PICKERING, S. J. Recycling technologies for thermoset composite materials-current status. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 37, no. 8, p. 1206–1215, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.030>. Acesso em 7 de março de 2022.

PIOTROWSKA, K.; KRUSZELNICKA, W.; BAŁDOWSKA-WITOS, P.; KASNER, R.; RUDNICKI, J.; TOMPOROWSKI, A.; FLIZIKOWSKI, J.; OPIELAK, M. Assessment of the environmental impact of a car tire throughout its lifecycle using the LCA method.

**Materials**, vol. 12, no. 24, 1 Dec. 2019. <https://doi.org/10.3390/MA12244177>. Acesso em 14 de fevereiro de 2022.

PLANCHE, J. P.; CLAUDY, P. M.; LE ÂTOFFE, J. M.; MARTIN, D. Using thermal analysis methods to better understand asphalt rheology. **Thermochimica Acta**, vol. 324, p. 223–227, 1998. Acesso em 20 de fevereiro de 2022.

SHELL. **The Shell Bitumen Handbook**. 6th ed. Londres: ICE Publishing, 2015.

SILVA, L. S.; NASCIMENTO, F. R.; PIRES NOGUEIRA, M. H.; LIMA, G. K. M. L.; SOBRINHO, D. C. da R. Utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus na composição de asfalto. vol. 7, 2018.

SINGH, M.; KUMAR, P.; MAURYA, M. R. Strength characteristics of SBS modified asphalt mixes with various aggregates. **Construction and Building Materials**, vol. 41, p. 815–823, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.062>. Acesso em 17 de fevereiro de 2022.

SUBHY, A. Advanced analytical techniques in fatigue and rutting related characterisations of modified bitumen: Literature review. **Construction and Building Materials**, vol. 156, p. 28–45, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.147>. Acesso em 17 de março de 2022.

SUN, X.; LIU, J.; HONG, J.; LU, B. Life cycle assessment of Chinese radial passenger vehicle tire. **International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 21, no. 12, p. 1749–1758, 2016a. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1139-0>. Acesso em 11 de fevereiro de 2022.

TRANSPARENCY MARKET RESEARCH. **Automotive Tire Market Insights, Trends & Growth Outlook**. 2020. Acesso em 13 de fevereiro de 2022.

WASHINGTON. **Waste Tires**. Washington, D.C., 2020. Acesso em 15 de fevereiro de 2022.

WILDNAUER, M.; MULHOLLAND, E.; LIDDIE, J.; KOFFLER, C.; MURPHY, S. **Life**

**Cycle Assessment of Asphalt Binder**. 2019. Acesso em 10 de fevereiro de 2022.

ZANIN, M.; MANCINI, S. D. **Resíduos Plásticos e Reciclagem: Aspectos gerais e tecnologia**. 1st ed. EdUFSCar, 2009.

ZHANG, F.; YU, J. The research for high-performance SBR compound modified asphalt. **Construction and Building Materials**, vol. 24, no. 3, p. 410–418, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.003>. Acesso em 17 de fevereiro de 2022.