

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Amanda Bitencourt

**PANORAMA DA DESCARBONIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE**

Santa Maria, RS
2023

Amanda Bitencourt

**PANORAMA DA DESCARBONIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS
2023

Amanda Bitencourt

**PANORAMA DA DESCARBONIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil, da Universidade Federal de Santa
Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 19 de agosto de 2023:

**Luciano Pivoto Specht, Eng. Dr.
(Presidente/Orientador)**

Deividi Pereira, Eng. Dr.

Chaveli Brondani, Eng. Ma.

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

Durante o período de graduação, muitas pessoas cruzaram meu caminho e, de alguma forma, deixaram suas contribuições para o meu desenvolvimento pessoal e profissional e enriqueceram o meu processo de aprendizado.

Não vivemos sozinhos no mundo, e, muitas vezes, fazemos tudo o que fazemos com a ajuda do próximo. Nesse sentido, gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais, pelo dom da vida, por proporcionarem a mim um ensino de qualidade, por nunca medirem esforços para me apoiar nas minhas decisões e necessidades e por acolherem minhas preocupações.

Aos meus amigos e familiares, pela companhia e pelo incentivo tanto nos momentos bons, quanto nos momentos difíceis. Obrigado por compreenderem minhas angústias e minha ausência enquanto me dedicava aos estudos e à realização deste trabalho. Aqui, estendo, especialmente, aos meus avós, que partiram no período de realização deste trabalho, mas que permanecem eternos.

Ao professor Luciano Pivoto Specht, que me orientou durante a presente pesquisa, com entusiasmo e paciência. Agradeço a sua disponibilidade em compartilhar seu conhecimento sobre o assunto.

À instituição de ensino Universidade Federal de Santa Maria, essencial no meu processo de formação profissional, pelo fornecimento de um curso com qualidade e pelas oportunidades oferecidas.

Aos colegas de turma, com quem convivi intensamente durante os anos da graduação, pelo companheirismo e pela troca de experiências e de informações. Sem o auxílio de vocês, o caminho teria sido muito mais árduo.

Aos demais professores, pelo seu exercício de ensinar e compartilhar vivências no âmbito profissional de um engenheiro civil, guiando, assim, meu aprendizado e minha formação acadêmica.

Aos colegas de trabalho durante meu estágio de dois anos na Secretaria de Infraestrutura e Serviços Públicos da Prefeitura Municipal de Santa Maria, que repassaram muitos conhecimentos técnicos, valores éticos da profissão e, assim, fortaleceram minha afeição à área de pavimentação e transportes.

E, finalmente, a mim mesma, pela determinação, dedicação e coragem na busca pelos meus objetivos. Por ter feito sempre o que era possível, buscando, ao máximo, a minha melhor versão.

RESUMO

PANORAMA DA DESCARBONIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

AUTORA: Amanda Bitencourt
ORIENTADOR: Luciano Pivoto Specht

O setor de transportes é um dos que mais leva uma região ao seu desenvolvimento e, por esse motivo, tem um forte poder de influência na economia mundial. A rede rodoviária, atualmente parte principal dentre os sistemas de transporte do Brasil, além de fornecer mobilidade para a sociedade, contribui significativamente nos impactos ambientais, tanto durante a construção de uma estrada, quanto na sua operação e manutenção. Pouco se fala sobre a emissão de gases do efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono, ou gás carbônico, nas etapas de produção de insumos e da construção de uma estrada. O Brasil é o sexto colocado entre os países com maiores emissões de gases do efeito estufa, com média de 3% do total mundial, de acordo com o SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa). A produção da mistura asfáltica usinada a quente, que é comumente utilizada na construção e na manutenção da camada de revestimento de pavimentos, emite grandes quantidades de gás carbônico. Dessa maneira, cabem estudos para a criação de ferramentas de análise de impactos ambientais na construção dos pavimentos e na produção de insumos para tal, assim como para propor soluções mitigadoras dos impactos negativos e maximizadoras dos impactos positivos na natureza. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é apresentar um panorama mundial e, especialmente, brasileiro, acerca da preocupação com a emissão de gás carbônico na produção de misturas asfálticas para uso em revestimentos de pavimentos, e propor práticas sustentáveis para reduzir as emissões. Além disso, pesquisar e informar a respeito da pegada de carbono, das compensações de carbono equivalente e do mercado de créditos de carbono, relacionando com o setor da pavimentação, mais especificamente, com a produção de misturas asfálticas. Ao final do presente trabalho, pode-se concluir que o envolvimento da economia mundial na estabilização de mercados de créditos de carbono pode ser uma solução para atingir o equilíbrio de emissões de GEE. A utilização de outros tipos de asfalto, produzidos a partir de misturas asfálticas mornas e semimornas, também é solução para reduzir a pegada de carbono. E, por fim, a utilização de materiais como a casca de arroz, para separar o gás carbônico emitido em usinas de produção de energia, contribui para geração de energias mais limpas, podendo ser aplicada nas usinas de misturas asfálticas e nas etapas de construção dos pavimentos asfálticos.

Palavras-chave: Dióxido de carbono. Impactos ambientais. Misturas asfálticas. Pegada de Carbono. Mercado de créditos de carbono.

ABSTRACT

OVERVIEW OF DECARBONIZATION IN THE PRODUCTION OF HOT ASPHALT MIXTURES

AUTHOR: Amanda Bitencourt
ADVISOR: Luciano Pivoto Specht

The transport sector is one of the sectors that most leads a region to its development and, for this reason, it has a strong power of influence in the world economy. The road network, currently the main part of Brazil's transport systems, in addition to providing mobility for society, contributes significantly to environmental impacts, both during the construction of a road and in its operation and maintenance. Little is said about the emission of greenhouse gases (GHG), such as carbon dioxide, or carbon dioxide, in the stages of production of inputs and construction of a road. Brazil ranks sixth among countries with the highest emissions of greenhouse gases, with an average of 3% of the world total, according to the System for Estimating Emissions and Removals of Greenhouse Gases. The production of hot-rolled asphalt, which is commonly used in the construction and maintenance of the pavement layer, emits large amounts of carbon dioxide. In this way, studies are in order to create tools for analyzing the environmental impacts in the construction of pavements and in the production of inputs for this purpose, as well as to propose solutions to mitigate the negative impacts and maximize the positive impacts on nature. Therefore, the objective of this work is to present a world panorama, and especially a Brazilian one, about the concern with the emission of carbon dioxide in the production of asphalt mixtures for use in pavement coatings, and to propose sustainable practices to reduce emissions. Furthermore, research and report on the carbon footprint, equivalent carbon offsets and the carbon credits market, relating to the paving sector, more specifically, with the manufacture of asphalt. At the end of this work, it can be concluded that the involvement of the world economy in the stabilization of carbon credits markets can be a solution to reach the balance of GHG emissions. The use of other types of asphalt, produced from warm asphalt mixtures, is also a solution to reduce the carbon footprint. And, finally, the use of materials such as rice husks, to separate the carbon dioxide emitted in energy production plants, contributes to the generation of cleaner energy, and can be applied in asphalt plants and in the stages of construction of asphalt pavement.

Keywords: Carbon dioxide. Environmental impacts. Asphalt mixtures. Carbon footprint. Carbon credits.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da carga dos pneus de um veículo em um pavimento rígido e em um pavimento flexível.....	19
Figura 2 - Pavimento asfáltico em camada única e em duas camadas.....	22
Figura 3 - Classificação dos revestimentos asfálticos.....	24
Figura 4 - Malha rodoviária brasileira pavimentada por esfera responsável.....	32
Figura 5 - Localização das refinarias pertencentes à Petrobras.....	33
Figura 6 - Produção de ligante asfáltico por Estado.....	34
Figura 7 - Mapa da rede de distribuição de ligante asfáltico - distribuidoras da ABEDA e Refinarias.....	35
Figura 8 - Como ocorrem emissões asfálticas.....	39
Figura 9 - Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) encontrados em estudo da USEPA.....	39
Figura 10 - Temperatura de usinagem de misturas asfálticas.....	52
Figura 11 - Etapas do processo LEA® para misturas mornas.....	53
Figura 12 - Cera parafínica em flocos (esquerda) e em pastilhas (direita), para a produção de misturas mornas.....	54
Figura 13 - Etapas do processo de <i>Terminal Blending</i>	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	10
1.2	OBJETIVOS.....	11
1.2.1	Objetivo geral	11
1.2.2	Objetivos específicos	11
1.3	JUSTIFICATIVA.....	12
2	ASPECTOS DA CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	13
2.1	ASPECTOS GERAIS DA INFRAESTRUTURA DE PAVIMENTOS.....	13
2.1.1	Infraestrutura de pavimentos no passado	13
2.1.2	Infraestrutura de pavimentos no presente	16
2.1.3	Infraestrutura de pavimentos no futuro	17
2.2	CARACTERÍSTICAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	18
2.2.1	Propriedades do pavimento asfáltico	20
2.3	ETAPAS DE CONSTRUÇÃO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO.....	20
2.3.1	Histórico de técnicas construtivas de pavimentos	20
2.3.2	Camadas do pavimento asfáltico	22
2.3.3	Componentes da camada de revestimento asfáltico	23
2.3.4	Tipos de revestimento asfáltico	23
3	PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	26
3.1	OBTENÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO.....	26
3.1.1	Elementos químicos do ligante asfáltico	27
3.2	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE.....	28
3.2.1	Produção da mistura asfáltica a quente	28
3.2.2	Máquinas utilizadas na construção de pavimentos com mistura asfáltica a quente	30
3.2.3	Agentes envolvidos na cadeia produtiva das misturas asfálticas	31
3.2.4	Aspectos regulatórios das atividades que envolvem misturas asfálticas	35
3.3	EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE) NA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	37

4	O CARBONO E A SUA CONTRIBUIÇÃO NA POLUIÇÃO AMBIENTAL.	41
4.1	ALTERNATIVAS PARA CONTROLE.....	42
4.2	MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO.....	42
4.2.1	<i>Cap and Trade</i>	44
4.3	CARBONO EQUIVALENTE.....	46
4.4	NEUTRALIZAÇÃO DE CARBONO.....	46
5	PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS NA CONSTRUÇÃO DA CAMADA DE REVESTIMENTO DE PAVIMENTOS.....	49
5.1	CARACTERÍSTICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS E SEMIMORNAS.....	51
5.2	O “ASFALTO BORRACHA”.....	55
6	PEGADA DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE.....	59
6.1	O CAP PRO.....	59
6.2	O CAP AP.....	60
6.3	FONTE RENOVÁVEL DE ENERGIA ATRAVÉS DA CASCA DO ARROZ.	61
7	CONCLUSÕES.....	63
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
8	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor de transportes tem um forte poder de influência na economia mundial. A rede rodoviária, atualmente parte principal dentre os sistemas de transporte do Brasil, possui cerca de 1,7 milhões de quilômetros, considerando estradas pavimentadas e não pavimentadas. Os primeiros investimentos em estradas no Brasil foram feitos na década de 20. Nas décadas de 50 e 60, deu-se o estabelecimento do sistema rodoviário como a principal via de transporte, com a influência da indústria automobilística.

A malha rodoviária, além de fornecer mobilidade para a sociedade, contribui significativamente nos impactos ambientais, tanto durante a construção de uma estrada, quanto na sua operação e manutenção (LOUHGHALAM et al., 2017). Nesse sentido, as estradas são empreendimentos que necessitam da elaboração de um Estudo de Impacto Ambiental (EIA), da resolução CONAMA 001/86. O EIA objetiva identificar e prever impactos ambientais das obras. Além disso, propõe ações para maximizar impactos positivos e mitigar negativos.

Segundo Lopes (2015), a necessidade de praticidade, agilidade e economia no transporte de cargas e pessoas deu lugar a grandes obras de engenharia, que proporcionaram a ligação entre regiões. Conseqüentemente, foi imprescindível pavimentar as estradas, em função da piora nas suas condições de uso à medida que chuvas caíam e buracos abriam. Ao pavimentar, a dirigibilidade aumentou, porém o aumento dos impactos ambientais se tornou preocupação. Entre os impactos negativos, destaca-se a emissão de carbono, não somente dos veículos, mas também na construção das estradas e na produção dos insumos para a sua construção, como o ligante asfáltico e a mistura asfáltica.

Segundo a Carbon Trust, que tem como principal objetivo acelerar a transição para uma economia de baixo carbono, a pegada de carbono foi idealizada para medir a quantidade total das emissões de gases do efeito estufa originadas por uma pessoa, organização, evento ou produto. Todas as atividades que consomem algum tipo de energia deixam gases, que se acumulam na atmosfera, aquecendo o planeta.

Conforme Reis (2015), construir qualquer empreendimento sem causar impactos às estruturas naturais é impossível. Assim, cabem estudos para a criação de ferramentas de análise de impactos ambientais na construção dos pavimentos e na produção de insumos para tal, assim como para propor soluções mitigadoras dos impactos negativos e maximizadoras dos impactos positivos na natureza. De acordo com o mesmo autor, as legislações no âmbito da consciência ambiental ainda são recentes e frágeis. Diante do exposto, busca-se apresentar um panorama mundial e, especialmente, brasileiro, acerca da preocupação com a emissão de gases do efeito estufa, principalmente do gás carbônico, na produção de misturas asfálticas para uso em revestimentos de pavimentos, e propor práticas sustentáveis para reduzir as emissões. Além disso, pesquisar e informar a respeito da pegada de carbono, das compensações de carbono equivalente e do mercado de créditos de carbono, relacionando com o setor da pavimentação, mais especificamente, com a produção da mistura asfáltica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O propósito deste trabalho é fornecer uma visão global, incluindo o cenário brasileiro, sobre as preocupações relacionadas às emissões de dióxido de carbono durante a produção de misturas asfálticas para pavimentos. Além disso, visa expor abordagens sustentáveis para mitigar essas emissões. A pesquisa também abordará a pegada de carbono, as compensações de emissões equivalentes e o mercado de créditos de carbono, relacionando-os ao setor de pavimentação, especialmente à produção de misturas asfálticas.

1.2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Expor aspectos gerais sobre a construção de pavimentos asfálticos, no mundo e no Brasil;
- Apresentar características de pavimentos flexíveis, mais especificamente, os asfálticos;

- Apresentar processos de produção e usinagem da mistura asfáltica;
- Compreender sobre emissão de gases do efeito estufa, sobre o carbono e sua contribuição na poluição ambiental e alternativas para controle;
- Dissertar sobre pegada de carbono e mercado de créditos de carbono na produção de misturas asfálticas.

1.3 JUSTIFICATIVA

Em razão de a rede rodoviária ser uma das principais vias de transporte no Brasil, é necessário que as estradas sejam mantidas com a melhor qualidade possível, para que cumpram sua função de proporcionar mobilidade com agilidade, praticidade e economia. Mas, também, é essencial que sejam mensurados os impactos ambientais que o setor de infraestrutura causa na natureza, tanto nas etapas de construção de estradas, quanto de operação e manutenção, e na produção dos insumos necessários.

Pouco se fala sobre a emissão de gás carbônico nas etapas de construção de uma estrada. Entre todas as fontes de emissão de poluentes no mundo, a de carbono do transporte corresponde a 15% do total emitido (ZHAO et al., 2016).

O Brasil é o sexto colocado entre os países com maiores emissões de gases do efeito estufa, com média de 3% do total mundial, de acordo com o SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa). O Brasil também está no G20, grupo de países que representam 78% das emissões de gás carbônico no mundo.

A produção da mistura asfáltica usinada a quente, que é comumente utilizada na construção e na manutenção de pavimentos, emite grandes quantidades de gases do efeito estufa, como gás carbônico, metano e óxido nitroso. Na verdade, a emissão de gás carbônico já é observada desde a extração do petróleo.

2 ASPECTOS DA CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

O presente capítulo aborda definições e características construtivas dos pavimentos asfálticos. Inicialmente, tem-se alguns aspectos gerais sobre a infraestrutura de pavimentos. Em seguida, apresentam-se propriedades dos pavimentos flexíveis, em que se enquadram os pavimentos asfálticos. Na sequência, mantendo como assunto principal os pavimentos asfálticos, aborda-se etapas da construção de pavimentos asfálticos e da produção de seus insumos.

2.1 ASPECTOS GERAIS DA INFRAESTRUTURA DE PAVIMENTOS

Primeiramente, o sistema viário é composto pelas vias, formadas pelas ruas, avenidas, estradas, hidrovias, ferrovias, entre outros caminhos por onde é possível percorrer; pelos veículos, sejam eles automóveis, ônibus, caminhões, motocicletas, aviões, entre outros; pelos usuários, que são pedestres, motoristas, ciclistas, entre outros; e pelo meio ambiente, com suas condições climáticas, que, muitas vezes, implicam em situações de congestionamentos no trânsito devido a chuvas.

O tráfego compreende o conjunto de movimentos realizados por pedestres e veículos nas vias de circulação. Essas atividades refletem o cotidiano dos habitantes de uma localidade, destacando-se como uma questão tanto social, quanto técnica. O transporte desempenha um papel fundamental na progressão de uma região, servindo como seu ponto de partida. Isso se aplica a diversas esferas, como a produção agrícola, que depende de insumos e acesso aos consumidores; exportações, que necessitam de terminais portuários; e indústrias, que demandam a distribuição de seus produtos. Todo esse cenário só alcança viabilidade econômica através da infraestrutura de transporte. O maior benefício produzido pelos transportes é a mobilidade (ALBANO, J. F.).

2.1.1 Infraestrutura de pavimentos no passado

Durante um longo período, os seres humanos enfrentavam desafios para se deslocar de um lugar para outro e para transportar objetos. Em uma determinada época, começaram a utilizar animais para carregar cargas e, posteriormente, a invenção da roda permitiu o surgimento de primitivas carretas. No século XVIII, a

invenção da máquina a vapor deu origem aos primeiros meios mecânicos de transporte, tanto marítimos quanto ferroviários. Ao longo de um século, as ferrovias cresceram e expandiram-se, estabelecendo-se como um monopólio e sendo consideradas o único meio "moderno" e eficiente de transporte até a chegada dos veículos motorizados, no início do século XX. Cerca de duas décadas depois, o transporte aéreo também surgiu como uma opção.

As rodovias destacam-se por alcançar um maior número de usuários e proporcionar um retorno mais rápido sobre o investimento público. Embora exijam menor especialização e investimento em terminais, elas requerem operações de alto custo. A primeira estrada pavimentada conhecida foi construída no Egito por volta de 2500 a.C., para facilitar a construção das Grandes Pirâmides. À medida que a necessidade de expansão territorial crescia, foram criadas estradas com drenagem lateral e revestimento primitivo. Os egípcios usavam essas estradas para fins religiosos e festivos, dotando-as de um caráter decorativo (BALBO, 2007).

Os romanos aprimoraram as estradas, desenvolvendo um sistema de pavimentação que se assemelha ao que temos hoje, visando a durabilidade. A pavimentação naquela época, como nos dias de hoje, simbolizava uma sociedade avançada. A Via Appia Antica, construída em 312 a.C., é uma das primeiras estradas pavimentadas pelos romanos. Ela ligava Roma a Taranto, conectando a capital romana às províncias orientais.

Nos Estados Unidos, as primeiras estradas e ferrovias foram construídas sobre trilhas indígenas na Califórnia e no Novo México. Em 1600, havia até mesmo um sistema de sinalização nas estradas, com uma linha colorida separando o tráfego na estrada que saía da Cidade do México em direção ao interior. O século XVIII trouxe a invenção da máquina a vapor, que impulsionou o desenvolvimento dos primeiros meios mecânicos de transporte. Os barcos a vela foram substituídos por embarcações a vapor, e o transporte ferroviário terrestre teve início.

Na França, em 1775, o engenheiro Pierre Trésaguet reconheceu a importância da manutenção das estradas. No mesmo período, na Inglaterra, John Metcalf foi pioneiro no projeto de estradas considerando a necessidade de um sistema de drenagem adequado. No início do século XIX, nos EUA, foram introduzidas técnicas de pavimentação com camadas de materiais granulares britados, desenvolvidas por John L. McAdam e Thomas Telford. Em 1868, em Londres, o primeiro semáforo com luzes vermelhas e verdes foi instalado,

respondendo a um aumento de acidentes de trânsito. A partir de 1910, com a produção em massa de veículos automotores, as técnicas de construção de estradas avançaram rapidamente. O uso de cimento Portland e as misturas asfálticas se tornaram materiais de construção comuns.

Ao abordar a história do Brasil, registros históricos relatam a jornada de Aleixo Garcia em 1524, desde Patos, Santa Catarina, atravessando o atual Paraná. Essa expedição seguiu uma trilha até a confluência dos rios Paraguai e Pilcomayo. Essa trilha indígena era conhecida como Peabiru e parece ter sido a primeira estrada brasileira. Em 1674, Fernão Dias criou um caminho temporário que mais tarde se tornaria a estrada União, conectando Minas Gerais ao Rio de Janeiro e inaugurada em 1861. Em 1903, em São Paulo, Francisco Matarazzo licenciou o primeiro automóvel do Brasil. Em 1919, a Ford Motor Company decidiu estabelecer uma subsidiária no Brasil, iniciando suas atividades em 1º de Maio. Em 1921, foi promulgada a Lei n.º 1.835-C, estabelecendo normas para estudo, construção, conservação, segurança e policiamento das estradas de rodagem ("Lei Magnífica").

Em 1930, o presidente Washington Luiz Pereira de Souza proclamou a frase "governar é abrir estradas". A implantação de placas de trânsito no Brasil começou nesse ano. Em 1938, por meio do Decreto n.º 395 de 29 de abril, Getúlio Vargas criou o Conselho Nacional de Petróleo (CNP). Em 15 de dezembro do mesmo ano, o interventor federal Manoel Ribas criou o Departamento do Serviço de Trânsito (DST), atualmente conhecido como DETRAN/PR, ligado à Polícia Civil. Em 1939, iniciou-se a construção da rodovia que conecta o Rio de Janeiro à Bahia (BR-393/BR-116), marcando a primeira estrada de longa distância no Brasil e a primeira rota efetiva de integração nacional. Em 1941, o primeiro Código Nacional de Trânsito foi estabelecido pelo Decreto n.º 2.994. Isso criou o Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN, localizado no Distrito Federal e subordinado ao Ministério da Justiça e Negócios Interiores, e os Conselhos Regionais de Trânsito (CRT), nas capitais dos estados e subordinados aos governos estaduais.

Após a criação do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), em 1937, e do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER/RS), em 1950, o Brasil já tinha uma rede de 968 quilômetros de rodovias federais pavimentadas. Em 1953, a Petrobras foi fundada. Em 1965, o arquiteto português Artur Diniz Raposo recomendou a regularização das superfícies das estradas e incentivou a remoção de detritos e pavimentos deteriorados, a

recuperação de áreas de empréstimo e bota-fora, além da reconstrução ou demolição de edificações desapropriadas ao longo das rodovias. Isso marcou o início de maior integração das rodovias com a paisagem rural e uma abordagem de preservação ambiental. Em 1975, o governo federal criou o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) com o objetivo de promover uma fonte alternativa de energia. Em 1999, o Brasil contava com 436 rodovias transitáveis, incluindo 150 rodovias federais. Dessas, 164.244 km (9,52%) eram pavimentadas e 1.560.678 km (90,40%) eram não pavimentadas.

2.1.2 Infraestrutura de pavimentos no presente

No ano de 1995, havia aproximadamente 193 milhões de quilômetros de estradas em todo o mundo. Os Estados Unidos detinham a maior extensão, com mais de 6 milhões de quilômetros de rodovias e ruas, acompanhados por uma proporção de 700 automóveis para cada mil habitantes. A menor rede viária pertencia a Mônaco, abrangendo apenas 47 quilômetros. Atualmente, cerca de 80% dos deslocamentos de passageiros globalmente ocorrem por meio de estradas e rodovias. Na América Latina, essa porcentagem chega a 80% para passageiros e 60% para cargas, que são transportadas via rodovias. No Brasil, a extensão total de estradas e rodovias é de aproximadamente 1.720.700 quilômetros, situando o país como o detentor da quarta maior malha rodoviária do mundo. Entretanto, apenas 105.814 quilômetros são pavimentados, constituindo meros 12,4% da totalidade da rede viária. A predominância de pistas únicas agrava o cenário, tornando-o mais perigoso.

A rede rodoviária brasileira desempenha um papel crucial no transporte de mais de 60% das mercadorias entre os estados e atende a cerca de 90% dos passageiros, de acordo com o relatório anual da CNT. Para financiar a construção e manutenção dessa infraestrutura, são utilizados diversos recursos, tais como operações de crédito, verbas orçamentárias, Cide (Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico), taxas sobre combustíveis, pedágios e multas. No que se refere às multas, 70% são destinados a programas de segurança, enquanto os 30% restantes são empregados no reaparelhamento da Polícia Rodoviária.

Embora o trânsito de veículos seja fundamental para o progresso da sociedade, ele também acarreta problemas, como acidentes, congestionamentos,

ruídos e poluição do ar. Anualmente, em média, 33.000 pessoas perdem a vida em decorrência de acidentes. Os custos relacionados a esses incidentes no Brasil chegam a aproximadamente U\$10 bilhões anuais, incluindo despesas com hospitais, recuperação de veículos, perda de produtividade no trabalho, entre outros fatores.

2.1.3 Infraestrutura de pavimentos no futuro

Atualmente, já existem dispositivos eletrônicos que controlam a velocidade, contagem, pesagem e pedágios de veículos. As projeções futuras para a melhoria do tráfego incluem uma ampla gama de tecnologias. Nos próximos anos, podemos antecipar avanços significativos na eficiência dos veículos, na proteção ambiental, na redução do peso dos veículos e na segurança viária. Por exemplo, espera-se o desenvolvimento de motores a diesel com baixas emissões atmosféricas, novos geradores de energia elétrica integrados aos motores de partida, além de processos de manufatura mais eficientes e confiáveis graças a aprimoramentos na engenharia. (Essas previsões foram compartilhadas por Eng. Fábio Eduardo Peake Braga, Gerente Geral da SAE do Brasil, durante uma entrevista ao jornal do IGEA em fevereiro de 2001).

Adicionalmente, há propostas para Sistemas de Transporte Inteligente (ITS), que consistem em rodovias especiais equipadas com esteiras eletrônicas (sensores). Nesse cenário, os veículos seriam conduzidos por controle remoto desde a entrada até a saída. Outra ideia inovadora é a Autoestrada Automatizada (Automated Highway System), permitindo a formação de comboios de carros mantendo uma distância pré-definida entre si. Quando um motorista desejar sair da fila, basta trocar para outra via não magnetizada. Esse sistema possibilitaria que os veículos trafegassem em fila a uma velocidade padrão, reduzindo os riscos de acidentes. Com um tráfego controlado, as estradas teriam capacidade para acomodar duas a três vezes mais veículos, sem ameaças de colisões ou interrupções no fluxo (fonte: Gilberto Leal, Zero Hora, 12/09/1999).

Desde 2006, os veículos movidos a diesel fabricados no Brasil são equipados com motores com gerenciamento eletrônico visando economia e redução de poluição. Os modelos com sistemas eletrônicos tendem a ser, em média, de 12% a 15% mais caros do que seus equivalentes de motores mecânicos.

Em 2003, em Madri, foi introduzido o primeiro ônibus movido a célula de combustível, parte de um projeto que envolveu trinta ônibus desenvolvidos pela Daimler-Chrysler e Mercedes Benz. Esse ônibus é equipado com um motor elétrico alimentado por hidrogênio por meio de uma reação química. O hidrogênio comprimido é armazenado a 350 bar na parte superior do veículo. O ônibus tem capacidade para transportar 70 passageiros, autonomia de 200 quilômetros e velocidade máxima de 80 km/h. Os veículos movidos a hidrogênio produzem baixo nível de ruído e oferecem alto conforto aos passageiros. O hidrogênio é uma fonte abundante e não gera resíduos poluentes, apenas água como subproduto da reação química. A dificuldade de armazenamento tem sido um obstáculo para o uso mais generalizado do hidrogênio como substituto dos combustíveis fósseis, já que ele precisa ser comprimido em estado gasoso ou mantido a temperaturas extremamente baixas em estado líquido. No Brasil, o Centro Incubador de Empresas Tecnológicas (Cietec), em São Paulo, tem desenvolvido essa tecnologia. Em 2000, a Ford anunciou um investimento de US\$400 milhões no desenvolvimento de veículos movidos a células de hidrogênio. Um posto de abastecimento para veículos a hidrogênio já existe em Detroit, EUA.

No que se refere à pavimentação, o Brasil também tem visto avanços significativos, como misturas asfálticas ecológicas e pavimentos permeáveis. Essas inovações estão relacionadas à permeabilidade da camada asfáltica, que possui um alto índice de vazios, permitindo a drenagem da água para o aquífero. Além disso, estão em uso a reciclagem em misturas asfálticas, bioligantes em estudo e o biodiesel como fonte limpa de energia e combustível.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

O conceito de pavimento se resume numa estrutura complexa, composta por múltiplas camadas, situada sobre uma superfície nivelada, que tem como propósito a otimização das deslocamentos das pessoas, visando o conforto, a segurança e a eficiência econômica, bem como a facilitação do escoamento de águas pluviais. Estas camadas são projetadas para suportar as forças mecânicas decorrentes do tráfego veicular, das intempéries naturais e das condições climáticas.

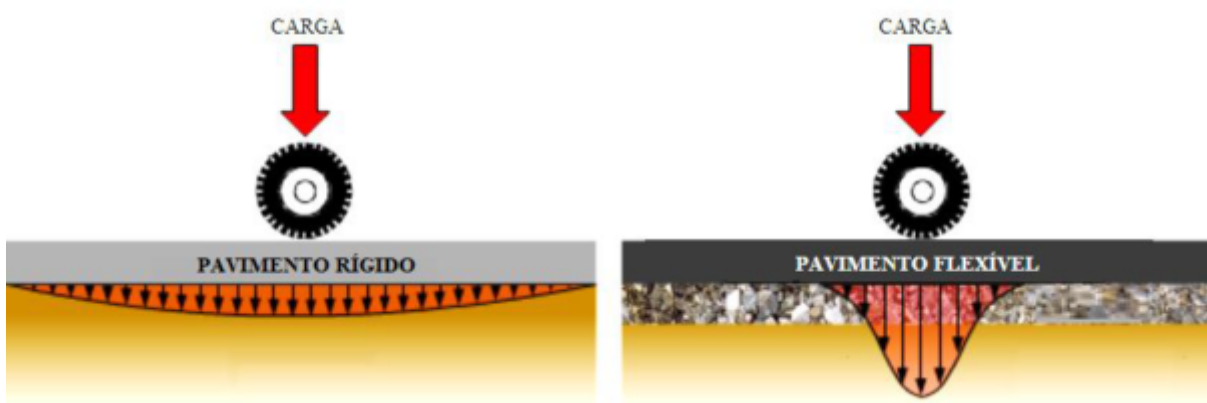
A seleção do tipo de pavimento mais adequado para uma estrada implica na condução de extensos estudos geotécnicos do solo, considerando as características

particulares da região, os fatores que influenciam o tráfego rodoviário e a adequação do sistema de drenagem já instalado ou necessário.

No rol das variedades de pavimento, destacam-se os pavimentos rígidos, semi-rígidos e flexíveis. Os pavimentos rígidos caracterizam-se pela sua cobertura em concreto, com placas resistentes que ostentam uma durabilidade significativa. Requerem escassas intervenções de manutenção quando devidamente implantados e possuem uma capacidade superior de absorção de impactos em relação às demais categorias de pavimento. Exemplos de aplicação incluem as vias exclusivas para ônibus.

Os pavimentos semi-rígidos apresentam uma base cimentada complementada por um revestimento flexível. Exibem um nível intermédio de deformação e acarretam um custo inferior, tanto na instalação quanto na manutenção, comparativamente aos pavimentos rígidos. Por sua vez, os pavimentos flexíveis são compostos por agregados e ligantes asfálticos. As camadas deste gênero de pavimento exibem uma deformação elástica sob a carga imposta, distribuída ao longo da sua estrutura. O pavimento asfáltico é um exemplar de pavimento flexível. A Figura 1 ilustra a distribuição do peso dos pneus de um veículo em pavimentos rígidos e flexíveis.

Figura 1 - Distribuição da carga dos pneus de um veículo em um pavimento rígido e em um pavimento flexível



Fonte: José Tadeu Balbo, 2007.

O pavimento asfáltico é, então, um pavimento flexível, em que a camada de revestimento, ou seja, a camada de rolamento, é composta por uma mistura de

agregados e ligantes asfálticos betuminosos. No presente trabalho, o objeto de pesquisa é o pavimento asfáltico.

2.2.1 Propriedades do pavimento asfáltico

Em sequência ao citado no item anterior, os ligantes presentes no pavimento asfáltico são oriundos da destilação do petróleo e são os responsáveis pelas características da mistura asfáltica.

Os materiais utilizados na pavimentação asfáltica devem garantir impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga, resistência ao trincamento térmico, considerando as condições de tráfego de um determinado local onde será implantada a pavimentação.

2.3 ETAPAS DE CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

A engenharia voltada para a infraestrutura, em particular no âmbito dos pavimentos, teve que passar por um processo de aprimoramento e otimização. Esse cenário exige que os profissionais engenheiros se mantenham atualizados, engajando-se na criação de estudos de cunho tecnológico ainda mais avançados, com o objetivo de assegurar a máxima eficiência possível, ao mesmo tempo em que minimizam os impactos, quer sejam de ordem financeira ou ambiental, conforme destacado por Senço (2007).

De acordo com Souza (1976), um pavimento é uma estrutura superior formada por diferentes materiais, que se entrelaçam de maneira complexa, possuindo uma interconexão de propriedades distintas, tais como resistência e capacidade de deformação, que são avaliadas com relação às tensões e deformações a que são submetidas.

2.3.1 Histórico de técnicas construtivas de pavimentos

As metodologias de pavimentação que tiveram suas origens em Roma foram gradualmente aprimoradas em resposta à necessidade de expansão territorial. Conforme argumentado por BALBO (2017), no período republicano de Roma, muitas estradas foram desenvolvidas através dos seguintes procedimentos. Primeiramente,

era realizada a escavação da camada de solo natural até se atingir um material sólido. A seguir, a camada chamada Statumen era introduzida, consistindo em uma base de pedras que proporcionava um suporte aprimorado, com uma espessura que variava entre 30 e 60 centímetros. Na sequência, havia a camada Indus ou Rodus, constituída por fragmentos de pedra, pedaços de ferro aglomerados com cal, areia, argila e pozolana (cinza vulcânica), com uma espessura entre 25 e 30 centímetros. Subsequentemente, vinha a camada denominada Nucleus, composta por pedras menores e uma mistura semelhante à Indus, para proporcionar impermeabilização ao pavimento, com uma espessura de 30 a 50 centímetros. Por fim, a camada Summa crusta era aplicada, composta por rochas basálticas justapostas.

Com a decadência econômica na Europa durante a Baixa Idade Média, as estradas pavimentadas pelos romanos entraram em desuso e foram danificadas pelas condições climáticas. Entretanto, com o fim da Idade Média, elas voltaram a ser utilizadas. Essa técnica de pavimentação persistiu até o século XVIII. Em 1770, na França, o engenheiro Pier-Maria Jerolame Trésaguet introduziu novos critérios de pavimentação. Sua abordagem propunha uma camada de base com 30 centímetros de pedras compactadas para uniformizar o apoio. Acima disso, uma camada superior de 8 a 10 centímetros era formada por pedras trituradas colocadas manualmente e compactadas posteriormente, minimizando vazios.

Em 1820, o engenheiro escocês John Loudon Mac-Adam apresentou suas considerações, contradizendo Trésaguet. Ele argumentava que a uniformização do terreno com pedras cravadas não era necessária. A camada granular não demandava confinamento para permitir o escoamento da água. Segundo Mac-Adam, as pedras deveriam ter dimensões máximas de 40mm (cúbicas) e 50mm (esféricas), com controle tecnológico rigoroso, e deveriam ser dispostas em camadas sobrepostas de espessura crescente, sem a necessidade de aglutinantes, já que a água cumpriria essa função. Essa especificação ficou conhecida como Macadame Hidráulico.

Entre 1825 e 1895, uma série de teorias foram desenvolvidas, incluindo as teorias de elasticidade, resistência dos materiais, geodésia e geometria. Essas contribuições impulsionaram o progresso das técnicas e teorias para a elaboração de estruturas de pavimentos. Além disso, com a introdução do cimento Portland, o concreto foi utilizado pela primeira vez em pavimentação, em Grenoble, França, e na

cidade de Ohio, em 1876. Em 1870, o químico belga DeSmedt construiu o primeiro pavimento com revestimento betuminoso em New Jersey, EUA.

Nesse contexto, as especificações de materiais e as técnicas de dimensionamento continuaram a ser aprimoradas ao longo dos anos, impulsionadas pelo avanço das pesquisas. Surgiram teorias como a de Boussinesq e Burmister, juntamente com especificações para o uso de concreto asfáltico e a incorporação de novos materiais em misturas asfálticas, como polímeros e borracha de pneu.

2.3.2 Camadas do pavimento asfáltico

O pavimento asfáltico é composto por quatro camadas principais. São elas: reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. Em casos mais comuns, um revestimento asfáltico de um pavimento consiste em uma única camada de mistura asfáltica. Com volumes de tráfego maiores, os revestimentos asfálticos podem incluir mais de uma camada de diferentes misturas asfálticas. Na Figura 2, pode-se observar essa divisão em camadas no pavimento.

Figura 2 - Pavimento asfáltico em camada única e em duas camadas



Fonte: Ceratti, 2006; Bernucci, 2008.

A camada de reforço do subleito é uma camada de espessura constante, colocada acima da camada de regularização do subleito existente, por razões como baixa capacidade de suporte do subleito, que tem função de evitar espessuras

elevadas na camada de sub-base. Ela atua na melhora da resistência da fundação do pavimento. A camada de sub-base é uma camada complementar à base, quando não for possível, por motivos técnicos e/ou econômicos, construir uma camada de base sobre a camada de regularização do subleito. A camada de base é a camada sobre a qual se constrói a camada de revestimento. Ela é destinada a resistir aos esforços verticais advindos dos veículos e distribuir às camadas inferiores. A camada de revestimento é a camada superior, destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmitir os esforços às camadas inferiores de forma atenuada. Além disso, tem a função de impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de rolamento dos veículos.

2.3.3 Componentes da camada de revestimento asfáltico

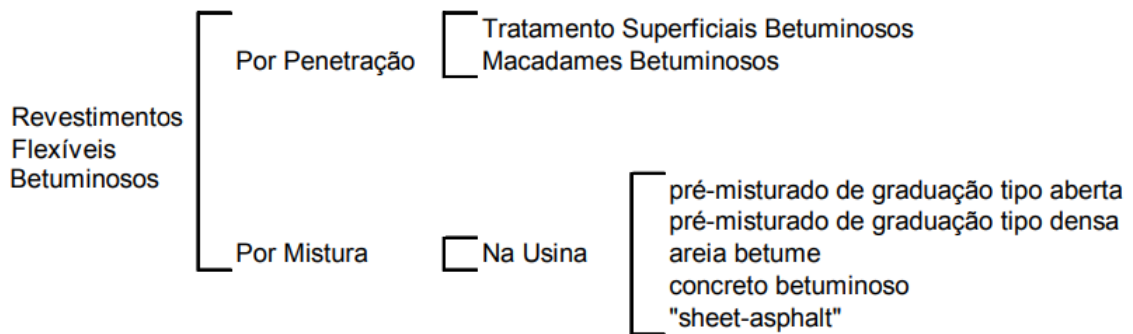
Os pavimentos asfálticos se distinguem com base nos tipos de revestimentos presentes em sua estrutura. Todas as formas de revestimento asfáltico compreendem combinações de ligantes asfálticos e agregados. Agregados são definidos como materiais que não possuem forma ou volume específicos e geralmente são inertes. Assim como na indústria da construção, esses materiais desempenham um papel fundamental na pavimentação, com a pedra britada sendo um exemplo notável. No entanto, a seleção dos agregados para a construção da camada de revestimento de pavimentos asfálticos é determinada pela disponibilidade, custo, qualidade e aplicação específica de cada material.

Com o avanço da tecnologia, novos materiais foram introduzidos para enriquecer as misturas asfálticas. Um exemplo notável é a incorporação de borracha de pneus moídos no Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), conhecido como asfalto ecológico. No entanto, neste contexto, apresenta-se uma perspectiva diferente acerca desse tipo de material.

2.3.4 Tipos de revestimento asfáltico

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT, os revestimentos asfálticos são classificados segundo o método de associação entre agregados e materiais betuminosos. Na Figura 3, mostra-se a classificação dos revestimentos asfálticos.

Figura 3 - Classificação dos revestimentos asfálticos



Fonte: José Tadeu Balbo, 2007.

Nesse contexto, o revestimento asfáltico se enquadra em dois métodos distintos: o revestimento por penetração, que por sua vez se desdobra em revestimentos betuminosos por penetração invertida e revestimentos betuminosos por penetração direta; e o revestimento por mistura, que se subdivide em pré-misturado a quente e pré-misturado a frio. É importante destacar que, no Brasil, o tipo de revestimento asfáltico mais amplamente empregado é o revestimento pré-misturado a quente. Nesse cenário, a composição asfáltica mais frequente é o Concreto Asfáltico (CA), também conhecido como Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) de graduação densa. Essa combinação incorpora agregados de diversas granulometrias e ligante asfáltico, ambos submetidos a aquecimento para atingir a viscosidade desejada.

No segmento dos revestimentos flexíveis betuminosos por penetração, encontramos os tratamentos superficiais betuminosos e os macadames betuminosos. Nos tratamentos superficiais betuminosos, o ligante asfáltico penetra de baixo para cima, implicando na aplicação de um ou mais revestimentos betuminosos. Já nos macadames betuminosos, a aplicação do ligante ocorre de cima para baixo, envolvendo o espalhamento e a compactação sucessiva das camadas de agregados, cada uma sendo tratada com o material betuminoso.

Por outro lado, os revestimentos flexíveis betuminosos por mistura desdobram-se em pré-misturado a quente e pré-misturado a frio. No pré-misturado a quente, os agregados são misturados com o ligante asfáltico antes da compressão, em usinas de mistura asfáltica. Esse processo é conduzido em temperaturas elevadas, em torno de 100 °C, e implica que tanto o transporte quanto o

espalhamento do revestimento se deem em altas temperaturas. No cenário do pré-misturado a frio, a diferença central reside na possibilidade de efetuar a mistura em temperatura ambiente.

3 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Este capítulo apresenta aspectos da produção de ligante asfáltico, insumo utilizado na etapa de construção da camada de revestimento dos pavimentos asfálticos, e do funcionamento de uma usina de mistura asfáltica. Concomitantemente a isso, traz-se a temática da poluição ambiental, por meio da emissão de gases do efeito estufa, especialmente o gás carbônico, ou Dióxido de Carbono (CO₂), que é pauta deste trabalho, que é implicada pela produção desse insumo.

3.1 OBTENÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

A produção do ligante asfáltico envolve a utilização de derivados de petróleo, os quais são obtidos de maneira natural ou artificial através de processos químicos ou físicos. Esse ligante, que pode apresentar uma consistência semi-sólida ou sólida, se apresenta com uma tonalidade escura. Para sua obtenção, o petróleo passa por um procedimento de aquecimento e subsequente resfriamento, ocasionando a separação dos seus componentes. Esse processo é conhecido como Destilação Fracionada.

Como mencionado, o ligante asfáltico consiste em uma mistura de hidrocarbonetos, caracterizados por um elevado ponto de ebulição, resultado da grande quantidade de átomos de carbono presentes nas moléculas (de 20 a 120 átomos por molécula). Quando submetido a altas temperaturas, seus componentes não se transformam em gases, sendo separados dos demais elementos do petróleo, como a gasolina, querosene e óleo diesel.

Assim, o ligante asfáltico é o remanescente resultante da vaporização de todos os outros componentes originalmente presentes no petróleo. Além do processo de destilação fracionada, outras fontes naturais de ligantes asfálticos podem ser encontradas na forma de depósitos naturais, originados a partir de fissuras na terra que permitem a liberação de petróleo, resultando em formações de lagos ou poços. Exemplos notáveis incluem o Lago Asphaltite, localizado na Palestina, o Pitch Lake (Lago de Piche) na ilha de Trinidad e Tobago, os poços de Alquitrán da Brea em Los Angeles, e o Lago Bermúdez na Venezuela. A Figura 5 ilustra o Pitch Lake em Trinidad e Tobago.

Registros históricos do uso de ligante asfáltico podem ser encontrados no Velho Testamento da Bíblia (nos livros de Gênesis e Êxodo) e também na época de Homero (cerca de 900 a.C). Até o ano de 1909, esse ligante era obtido de rochas naturais. Posteriormente, a extração passou a ser realizada a partir do petróleo.

3.1.1 Elementos químicos do ligante asfáltico

A composição química do ligante asfáltico é intrinsecamente vinculada ao tipo específico de petróleo do qual ele se origina. Considerando a vasta diversidade de aproximadamente 1500 tipos de petróleo identificados atualmente, as misturas asfálticas podem exibir uma considerável variabilidade. De maneira geral, existe uma gama de petróleos que apresentam uma maior proporção de ligante asfáltico, bem como aqueles com quantidades menores desse componente. Dois exemplos notáveis de petróleos que contêm o tipo de ligante asfáltico mais adequado para pavimentação de estradas e ruas são o petróleo Boscan e o petróleo Bachaquero, ambos encontrados na Venezuela.

O ligante asfáltico é constituído por aproximadamente 90% a 95% de hidrocarbonetos e 5% a 10% de heteroátomos, incluindo elementos como oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais. Esses elementos, tais como vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio, estão unidos por ligações covalentes. A composição química da mistura asfáltica possui uma influência direta no desempenho físico e mecânico do material. É por essa razão que podemos observar diferenças na resistência da mistura asfáltica em diferentes locais, levando a situações onde alguns trechos apresentam alta durabilidade enquanto outros são propensos a apresentar buracos de forma constante.

Dentre os compostos químicos presentes no ligante asfáltico, destacam-se os Asfaltenos, que consistem em aglomerados de hidrocarbonetos naftênicos, caracterizados por hexágonos contendo três ligações duplas, condensados e cadeias saturadas curtas. Outro grupo de compostos presente são os compostos saturados, que são formados por cadeias carbônicas extraordinariamente longas e compreendem apenas ligações simples entre os átomos de carbono. Além disso, encontramos as resinas, compostas principalmente por hidrogênio e carbono, com proporções menores de oxigênio, enxofre e nitrogênio. As resinas são geralmente sólidas ou semi-sólidas, de coloração marrom-escura, possuindo natureza polar e

exibindo uma forte capacidade adesiva. Por fim, há os compostos aromáticos, que apresentam em sua estrutura ligações aromáticas, com hexágonos contendo três ligações duplas, podendo possuir ramificações tanto saturadas quanto insaturadas.

3.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

O conceito de usinagem asfáltica abrange todos os procedimentos relacionados à produção da mistura asfáltica, um componente de extrema importância para a infraestrutura urbana. Esse processo engloba desde a extração da matéria-prima até sua transformação, culminando na aplicação nas vias urbanas e rodovias através de máquinas e equipamentos especializados em pavimentação.

Uma usina de mistura asfáltica é uma instalação destinada à produção em larga escala da mistura asfáltica. Ela realiza as etapas de fabricação desse insumo, incluindo a dosagem do cimento asfáltico de petróleo e dos agregados minerais, seguindo-se a secagem e o aquecimento desses materiais, ao mesmo tempo em que filtra os gases liberados durante o processo. Uma vez concluído esse ciclo, a mistura asfáltica está pronta para ser aplicada.

As operações diárias em uma usina de mistura asfáltica consistem em dosar os materiais necessários para a produção. Após a separação das quantidades adequadas dos componentes, esses materiais passam por um processo de secagem antes de serem aquecidos em temperaturas elevadas. Isso resulta na transformação em uma mistura ligante asfáltica. Consequentemente, essa mistura está pronta para ser utilizada nos equipamentos especializados para a execução de trabalhos de pavimentação.

3.2.1 Produção da mistura asfáltica a quente

Dentro dos processos intrínsecos à produção da mistura asfáltica, que buscam conferir ao material características ideais para sua mistura e posterior compactação, incluem-se as etapas de combinação do ligante com os agregados e a subsequente compactação do material misturado. O primeiro passo no âmbito da usinagem asfáltica envolve a dosagem precisa dos agregados. Essa atividade visa assegurar que a quantidade adequada de materiais seja combinada com o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Essa etapa é crucial, uma vez que a qualidade final da

mistura asfáltica, em termos de resistência, durabilidade e compactação, depende de uma matéria-prima administrada em proporções específicas, conhecidas como traços.

A primeira abordagem para realizar a dosagem dos agregados é conhecida como pesagem dinâmica, um processo comum em usinas de produção contínua. Nesse processo, uma máquina equipada com dois silos de recebimento é empregada para inserir os agregados. A proporção dos insumos deve ser mantida uniforme em todos os silos, por meio da medição de carga, garantindo assim a precisão do traço da mistura asfáltica.

Para empresas que operam usinas de produção fixa (constituindo uma minoria no cenário das usinas de mistura asfáltica no Brasil), a dosagem é realizada por meio de um processo de peneiramento. Nesse método, a separação dos agregados ocorre em uma torre, onde são divididos em partículas e armazenados em compartimentos distintos. Um benefício desse processo de peneiramento é a eliminação dos riscos de contaminação da mistura, tornando essa abordagem de dosagem mais eficaz.

Os agregados são dispostos em silos, enquanto o CAP é acondicionado em um tanque de abastecimento, onde é mantido em altas temperaturas. Através da cabine de controle, o operador define as quantidades de cada material para compor a mistura asfáltica. A máquina controla o fornecimento de modo a alcançar o traço desejado. Utilizando esteiras, os agregados são transportados para um tambor de secagem, que age como um forno. Nessa fase, ocorre a mistura dos agregados e a eliminação de toda a umidade por meio do aquecimento a gás. A ausência de umidade nos agregados assegura a qualidade do produto final.

Após a dosagem, secagem e aquecimento dos agregados, eles passam por uma etapa de mistura com o CAP, o ligante asfáltico. Essa combinação resulta no que é conhecido como mistura asfáltica. O produto é então direcionado para caminhões. É fundamental que um operador verifique a temperatura final da mistura asfáltica para garantir que ela se encontre nas condições ideais para uso. Existem duas abordagens para a mistura: o uso de um misturador rotativo externo ou um misturador externo do tipo pug-mill. O misturador pug-mill consiste em compartimentos de dois eixos com pás, que movem os materiais para promover a mistura dos agregados com o CAP. O CAP, nesse caso, não entra em contato com altas temperaturas, pois permanece separado do tambor de secagem, o que

contribui para a longevidade da mistura asfáltica. Já no caso do misturador rotativo, ele é acoplado ao tambor de secagem, fazendo com que o CAP entre em contato com temperaturas mais elevadas. Essa é a diferença distintiva entre o misturador rotativo e o pug-mill.

3.2.2 Máquinas utilizadas na construção de pavimentos com misturas asfálticas a quente

Dentre os equipamentos essenciais nas operações de pavimentação, destacam-se os caminhões, as vibroacabadoras e os rolos compactadores. A excelência e eficiência do projeto final estão intrinsecamente ligadas à precisão técnica oferecida por esses equipamentos específicos para suas respectivas funções.

Os rolos compactadores do tipo "pé de carneiro" se destacam por seus mecanismos que se assemelham às patas dos carneiros, compostos por cilindros dotados de uma superfície em relevo. Esses cilindros podem ser lisos ou pneumáticos. Vale ressaltar que essa diferenciação é determinada pela função desempenhada, não pela preferência. O propósito das "patas" nos rolos é penetrar no solo, aumentando a área de contato e agilizando o processo de compactação. Geralmente, essa máquina é recomendada para solos com níveis balanceados de umidade e também em terrenos irregulares, já que as saliências conferem maior mobilidade.

Por outro lado, os rolos compactadores lisos, similares aos rolos "pé de carneiro", carecem de protuberâncias nos cilindros. Portanto, são mais versáteis, podendo ser usados para compactar materiais como brita, concreto, mistura asfáltica e terra batida, entre outros. Esses rolos são particularmente eficientes no processo de pavimentação de materiais argilosos e são mais frequentemente aplicados em solos secos e densos.

Os rolos compactadores pneumáticos, por sua vez, adotam pneus em vez de cilindros na parte frontal. Sua função é conferir um acabamento de qualidade superior, empregando o próprio peso da máquina no processo.

As vibroacabadoras desempenham um papel central em todo o ciclo de usinagem asfáltica e pavimentação. Responsáveis pela aplicação da camada de mistura asfáltica, esses equipamentos mantêm o material aquecido enquanto realizam a pré-compactação, movendo-se ao longo da área a ser pavimentada.

Os caminhões-pipa são responsáveis pelo transporte de grandes volumes de água, que são pulverizados sobre superfícies, tanto durante o processo de pavimentação quanto na terraplanagem. Essa umidificação prepara o solo para a atuação das demais máquinas.

Os caminhões basculantes possuem capacidade para transportar e depositar grandes quantidades de materiais, desempenhando uma função complementar às vibroacabadoras. Esses dois tipos de equipamentos atuam de forma sinérgica, sendo fundamental combinar os caminhões basculantes com as vibroacabadoras, que são vitais na aplicação da mistura asfáltica. Enquanto o caminhão despeja o material e abastece a vibroacabadora, esta última realiza a aplicação propriamente dita.

3.2.3 Agentes envolvidos na cadeia produtiva das misturas asfálticas

A cadeia produtiva do segmento de mistura asfáltica envolve cinco grupos principais de agentes, cada um desempenhando um papel específico no processo. O primeiro refere-se às empresas fornecedoras de insumos, que são responsáveis por fornecer os materiais utilizados nas diferentes etapas da cadeia produtiva. Isso inclui insumos para o refino de petróleo, como catalisadores e produtos químicos, emulsificantes e polímeros utilizados pelas distribuidoras para modificar as misturas asfálticas e até mesmo agregados para construtores durante obras de pavimentação. No Brasil, a Petrobras desempenha um papel fundamental como fornecedora de ligantes asfálticos.

A Petrobras é uma refinadora de petróleo que produz diferentes tipos de produtos asfálticos, como o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e o asfalto diluído (ADPs). O CAP é utilizado em obras de pavimentação e em aplicações industriais, enquanto o ADP também é produzido. Esses produtos são transportados por distribuidoras autorizadas pela ANP.

As distribuidoras credenciadas pela ANP são responsáveis pelo transporte dos produtos asfálticos das refinadoras para suas áreas de aplicação. Elas também têm a autorização para realizar modificações nos produtos, como a criação de emulsões asfálticas ou misturas asfálticas modificadas com polímeros.

As transportadoras autorizadas pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) têm a função de transportar a mistura asfáltica dos distribuidores

ou refinadoras para os construtores ou consumidores finais. Elas não estão autorizadas a realizar transformações nos produtos.

Os construtores recebem os materiais necessários para a produção das misturas asfálticas, incluindo agregados e ligantes asfálticos, e realizam a composição em usinas apropriadas. Eles executam obras de pavimentação em vias urbanas, rurais, aeroportos, entre outros. O consumidor final principal é o Governo (federal, estadual ou municipal), seguido por concessionárias privadas, que são responsáveis por uma parte da malha rodoviária.

É importante observar que a cadeia produtiva da mistura asfáltica envolve diversos agentes interconectados, desde a produção dos insumos até a aplicação final nas vias. Cada etapa desempenha um papel crucial na qualidade e no sucesso das obras de pavimentação, garantindo a infraestrutura rodoviária necessária para o desenvolvimento urbano e econômico. Na Figura 4, tem-se os responsáveis pela malha rodoviária pavimentada brasileira (2005).

Figura 4 - Malha rodoviária brasileira pavimentada por esfera responsável

Tabela 3 - Malha rodoviária brasileira pavimentada por esfera responsável (km) 2005			
Malha	Rede Pavimentada (km)	Sob Concessão*	
		km	%
Municipal	22.735	25	0,3
Estadual	98.377	8.316	84,6
Jurisdição Estadual Transitória	17.050		0,0
Federal	57.933	1.493	15,2
Total	196.095	9.834	100

*Dados de 2006. Fonte: Centro de Pesquisa e Pós-Graduação em Administração de Empresas da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPEAD), 2007.15

No território nacional, das treze refinarias presentes, oito pertencentes ao sistema Petrobras estão envolvidas na produção de ligantes asfálticos com as especificações de CAP e ADP. Essas refinarias estão concentradas principalmente nas regiões Sul e Sudeste do país, conforme ilustrado na Figura 5. Um exemplo notável é a Refinaria Duque de Caxias (REDUC), localizada no Rio de Janeiro, que é responsável pela produção do CAP 30-45. A maior parcela desse produto é direcionada ao suprimento da demanda local na cidade do Rio de Janeiro, onde é primordialmente utilizado para pavimentação em âmbito municipal.

As unidades industriais das distribuidoras também têm a capacidade de produzir o CAP 30-45, conforme as diretrizes estabelecidas pela ANP. No entanto, é importante notar que o custo associado à produção desse tipo específico de CAP é mais elevado quando comparado à aquisição direta da refinaria. Esse aumento de custo é devido ao processo pelo qual o CAP 50-70 é transformado em CAP 30-45 pelas distribuidoras, acarretando a aplicação do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) sobre o produto final. Essa tributação adicional resulta em um custo superior ao obtido através da aquisição direta na refinaria.

Figura 5 - Localização das refinarias pertencentes à Petrobras

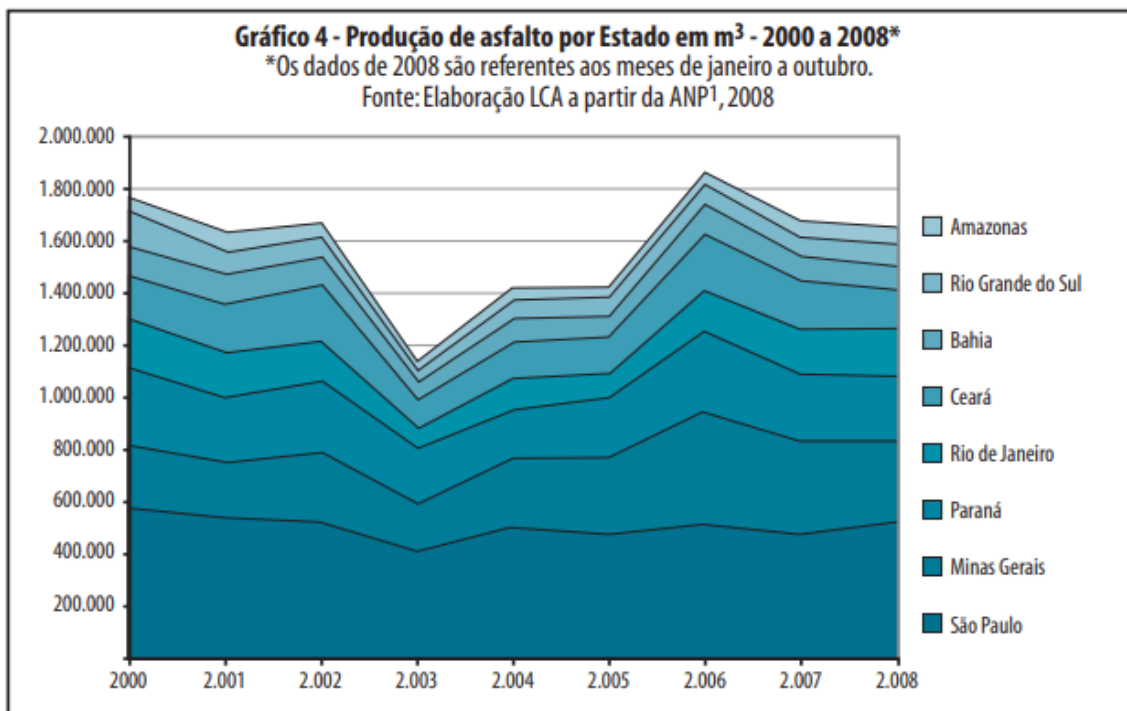


Fonte: Petrobras, 2008

Na Figura 6, é apresentada a produção de ligante asfáltico (CAP) por estado durante o período de 2000 a 2008. Uma análise dos dados revela que cerca de 61%

da produção total desse ligante no país está concentrada na região Sudeste. Além disso, ao longo dos oito anos considerados, há variações na produção. O ponto mais baixo da série ocorreu em 2003, com uma produção de aproximadamente 1,135 milhões de metros cúbicos. Notavelmente, em 2008, com base nos números fornecidos pela Petrobras, a produção de ligante asfáltico atinge o marco de 2,12 milhões de metros cúbicos.

Figura 6 - Produção de ligante asfáltico por Estado



Fonte: Petrobras, 2008

A Figura 7 apresenta de forma destacada as instalações industriais e bases de distribuição pertencentes a dezesseis empresas distribuidoras de ligante asfáltico associadas à Associação Brasileira de Empresas Distribuidoras de Asfalto (ABEDA). Essa associação engloba cerca de 96% do total de ligante asfáltico distribuído no território brasileiro.

Figura 7 - Mapa da rede de distribuição de ligante asfáltico - distribuidoras da ABEDA e Refinarias



Fonte: Petrobras, 2008

3.2.4 Aspectos regulatórios das atividades que envolvem misturas asfálticas

A Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) é um órgão governamental subordinado ao Ministério de Minas e Energia, encarregado de regulamentar as atividades relacionadas à produção, processamento, importação, exportação e transporte de petróleo e seus derivados. Além dessa função, a ANP também desempenha o papel de estabelecer as especificações para o ligante asfáltico conhecido como CAP, que está diretamente ligado à qualidade do produto.

Os princípios fundamentais que orientam a regulamentação do petróleo e seus derivados estão definidos na Lei do Petróleo (Lei nº 9.478/97). A ANP se esforça continuamente para regular a comercialização, distribuição e manutenção da

qualidade dos ligantes asfálticos por meio de portarias e resoluções. As refinarias só podem comercializar produtos que atendam às especificações da ANP, enquanto as distribuidoras de ligantes asfálticos são autorizadas a adicionar aditivos, realizar misturas e processamento industrial.

A atividade de distribuição de ligantes asfálticos é regulamentada pela Resolução ANP n° 2, de 14/01/05, que estabelece que os distribuidores só podem exercer essa atividade mediante autorização prévia da ANP. A distribuição é considerada um serviço de utilidade pública e abrange aquisição, armazenamento, transporte, aditivação, processamento, mistura, comercialização, controle de qualidade e assistência técnica ao consumidor. A mesma resolução destaca que as distribuidoras só podem adquirir ligantes asfálticos de produtores nacionais, importadores autorizados pela ANP ou outras distribuidoras autorizadas.

Antes de obter a autorização de funcionamento, as distribuidoras passam por um processo de habilitação, no qual precisam comprovar a viabilidade técnico-econômica do projeto, bem como investimentos diretos e indiretos. Atualmente, há 27 distribuidoras autorizadas pela ANP, que são avaliadas com base em critérios como infraestrutura de entrega do produtor, compatibilidade entre locais de entrega e bases próprias, e volume de aquisição versus capacidade de armazenamento.

A relação entre distribuidores e produtores é regulamentada e supervisionada pela ANP, que age como mediadora em possíveis conflitos. Além disso, as distribuidoras têm a responsabilidade de treinar seus funcionários ou contratados para garantir o correto transporte, manuseio, distribuição e comercialização dos ligantes asfálticos, assegurando a conformidade com as especificações técnicas estabelecidas pela ANP, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP).

A normalização é supervisionada pela ABNT, que regula os testes de produtos por meio de solicitações do setor de mistura asfáltica, delegando ao Instituto Brasileiro do Petróleo e Gás (IBP) a responsabilidade de desenvolver testes para avaliar a qualidade da mistura e suas características. A ANP, com base nos testes e padrões definidos pela ABNT, aprova as especificações a serem adotadas pelos participantes da cadeia. Outros órgãos envolvidos na cadeia, como o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Departamentos de Estradas de Rodagem (DERs), prefeituras e concessionárias, são consumidores

finais que estabelecem procedimentos e especificações para a aplicação do CAP, além de contratarem projetistas para definir a estrutura das estradas e os materiais a serem usados nas obras de pavimentação. Eles também podem adquirir diretamente o CAP das refinarias.

3.3 EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE) NA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Nas várias etapas envolvidas na produção de mistura asfáltica, diversos impactos ambientais são deixados. Um dos fatores que contribui para isso são os asfaltenos, componentes da mistura asfáltica que contêm hidrocarbonetos aromáticos, uma classe de substâncias químicas altamente poluentes. A adição de querosene em certos tipos de cimentos asfálticos também traz riscos ao meio ambiente e à saúde, pois pode levar à lixiviação e, conseqüentemente, à contaminação dos lençóis freáticos.

A questão dos Gases de Efeito Estufa (GEE) é crucial. Esses gases ficam na atmosfera, absorvem a radiação solar e dificultam a dissipação de calor para o espaço, resultando no aquecimento global conhecido como "efeito estufa". Alguns dos principais GEE são dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozônio (O₃) e vapor d'água. Embora o efeito estufa seja natural e necessário para a manutenção de temperaturas habitáveis na Terra, as preocupações se concentram nas emissões humanas de GEE, que têm contribuído para o aumento das temperaturas globais desde o século 20. O dióxido de carbono (CO₂), também conhecido como gás carbônico, é o GEE mais significativo, sendo emitidas cerca de 37 bilhões de toneladas de CO₂ no mundo apenas em 2018.

A emissão de GEE está associada ao uso de combustíveis fósseis. Como esses combustíveis são utilizados no processo de aquecimento do ligante asfáltico, as misturas asfálticas também contribuem para o aumento das emissões. O impacto ambiental da produção de misturas asfálticas está relacionado ao tipo de combustível usado, aditivos empregados, o uso de material reciclado (fresado) ou não, bem como o tipo de agregado. Todas essas variáveis podem influenciar as emissões de CO₂.

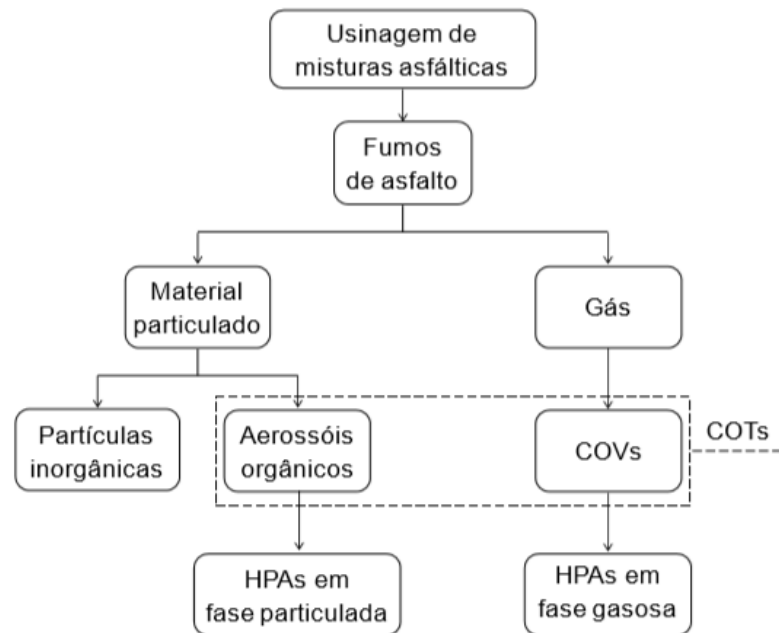
Misturas asfálticas, especialmente o Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ), são amplamente empregadas em projetos de infraestrutura rodoviária no Brasil e globalmente. Essas misturas são aquecidas a temperaturas entre 150°C e 170°C. O aquecimento intenso faz com que a fração de componentes oleosos (aromáticos) diminua, resultando em envelhecimento prematuro da mistura. Durante o aquecimento, vapores são liberados e, ao entrar em contato com o ar, condensam em fumos de asfalto.

O aquecimento na produção de mistura asfáltica tem várias finalidades, como secar os agregados (evitando o stripping, que é a perda de aderência entre ligante e agregado), manter a temperatura adequada para a mistura, garantir que o ligante cubra os agregados corretamente e reduzir a viscosidade para bombeamento na usina. No entanto, a liberação de vapores e fumos de asfalto é uma consequência desse processo.

As partículas suspensas no ar recebem denominações específicas, como poeira, fumaça, fumos e cinzas (partículas sólidas) e névoas, sprays e fog (partículas líquidas). Quando essas partículas têm tamanho inferior a 100 micrômetros, são chamadas de aerossóis. Partículas finas (menores que 2,5 micrômetros) podem chegar aos pulmões e causar doenças, incluindo câncer. Na fase gasosa, os poluentes são compostos orgânicos voláteis (COV), que reagem com óxidos de nitrogênio e contribuem para a formação de ozônio, poluente tóxico e cancerígeno.

A produção de misturas asfálticas e a emissão de poluentes, incluindo GEE, estão intimamente ligadas ao uso de combustíveis fósseis e às condições do processo de usinagem. Portanto, medidas de mitigação e técnicas mais sustentáveis são essenciais para minimizar esses impactos ambientais e proteger a saúde pública. Na Figura 8, tem-se o esquema representativo de como ocorrem as emissões asfálticas.

Figura 8 - Como ocorrem emissões asfálticas



Fonte: MOTTA, 2011.

A *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) recomenda que os operários trabalhadores em obras de infraestrutura não fiquem sujeitos a partículas totais em suspensão em uma concentração maior do que $5\text{mg}/\text{m}^3$ de ar em um período de 15 minutos. Em países como Austrália e Estados Unidos, é exigido um rigoroso controle de partículas em atividades como a mineração. Em 1994, Lutes et al publicaram um estudo sobre as emissões da mistura asfáltica aplicada a quente, tendo apontado os resultados conforme a Figura 9, quanto às emissões tóxicas de HAP. O estudo detectou, também, exposição a vapores de benzeno e fumos contendo chumbo. Em 1997, Mendes et al já indicavam que a exposição à mistura asfáltica e piche estavam relacionadas a um elevado risco de os trabalhadores desenvolverem câncer de pulmão e de pele.

Figura 9 - Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) encontrados em estudo da USEPA

Benzo (a) pireno	Benzo (k) fluoranteno
Benzo (a) antraceno	Criseno
Fluoranteno	Indeno (1,2,3) pireno
Naftaleno	Pireno

Fonte: USEPA, 1994.

Um estudo intitulado "Cancer risk following exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a meta-analysis," conduzido pela London School of Hygiene and Tropical Medicine, identifica avaliações quantitativas que apontam para a exposição de trabalhadores aos fumos de asfalto e ao Benzo (a) pireno. Esses resultados enfatizam a necessidade de fornecer aos trabalhadores respiradores equipados com filtros, a fim de protegê-los contra exposição a material particulado e vapores orgânicos. É crucial notar que o material particulado liberado durante a pavimentação com mistura asfáltica contém partículas finas que podem penetrar nos pulmões, alcançar os alvéolos e se difundir na corrente sanguínea e no sistema linfático.

4 O CARBONO E A SUA CONTRIBUIÇÃO NA POLUIÇÃO AMBIENTAL

O Dióxido de Carbono (CO₂), também conhecido como gás carbônico, é um composto químico gasoso essencial para a vida no planeta. No entanto, quando presente em altas concentrações na atmosfera, ele desempenha um papel significativo no desequilíbrio do Efeito Estufa da Terra. Sua composição química consiste em um átomo de carbono e dois átomos de oxigênio. O CO₂ em condições normais não possui cheiro ou sabor, o que dificulta sua detecção. Organismos como árvores e plantas o liberam como parte do processo de respiração, resultando da oxidação do monóxido de carbono ou fechamento de poros para conservar água.

A emissão de dióxido de carbono ocorre de várias formas, incluindo produção de cimento, decomposição de seres vivos, atividades vulcânicas, agricultura, indústria, queima de combustíveis fósseis (carvão, gás natural e petróleo), desmatamento e queimadas.

No entanto, a preocupação não é apenas a presença do CO₂ na atmosfera, mas sim sua alta concentração, uma vez que é o principal contribuinte para o aquecimento global. O aumento da concentração de CO₂ na atmosfera começou com a Revolução Industrial, quando o uso intensivo de carvão e petróleo para energia foi introduzido. Desde então, essa concentração tem aumentado, juntamente com as emissões de outros gases do efeito estufa. Apesar de acordos internacionais como o Acordo de Paris, as emissões de CO₂ de países desenvolvidos e em desenvolvimento continuam a crescer. Em 2019, dados do Climate Watch mostraram que a China, os Estados Unidos e a Índia foram os maiores emissores de CO₂ na atmosfera.

A alta concentração de CO₂ resulta em poluição do ar, formação de chuva ácida e perturbações no Efeito Estufa, o que contribui para o aumento da temperatura global. Estudos da Faculdade de Medicina da USP indicam que a exposição à poluição do ar tem efeitos prejudiciais à saúde, incluindo o surgimento de doenças respiratórias e cardiovasculares, especialmente em grupos vulneráveis como idosos e crianças.

A Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE) estimou que seus países membros estariam dispostos a gastar cerca de US \$1,7 trilhão para evitar mortes causadas pela poluição do ar. No entanto, dados da

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de junho de 2022 indicam que as emissões de CO₂ estão 50% acima dos níveis pré-industriais.

4.1 ALTERNATIVAS PARA CONTROLE

O sequestro de carbono da atmosfera emerge como a principal estratégia para mitigar os efeitos do dióxido de carbono. As técnicas atuais, também conhecidas como neutralização de carbono, buscam replicar e fortalecer os processos naturais de captura de carbono. Isso inclui práticas como reflorestamento, que visa ao aumento da cobertura vegetal, eletrólise, uma reação de oxirredução que oferece uma alternativa para a produção de hidrogênio sustentável, e o sequestro geológico de carbono, que envolve a reintrodução do carbono na forma comprimida nos solos por meio de injeções em reservatórios geológicos. Adicionalmente, para reduzir as emissões de dióxido de carbono, é fundamental adotar fontes de energia renovável que substituam os combustíveis fósseis altamente poluentes. Essas fontes, como biomassa, energia solar e eólica, oferecem alternativas menos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. É crucial que as políticas governamentais continuem a implementar medidas de controle e padrões de qualidade do ar mais rigorosos, especialmente no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa.

4.2 MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO

Uma estratégia adicional para compensar as emissões de carbono é o mercado de créditos de carbono. Nesse mercado, uma tonelada de dióxido de carbono é equivalente a um crédito de carbono (t CO₂e). Empresas que conseguem reduzir suas emissões de gases poluentes podem obter esses créditos, que podem ser vendidos em mercados financeiros nacionais e internacionais. Isso permite que empresas que reduzem suas emissões possam lucrar com a venda desses créditos. Por outro lado, países que emitem mais gases poluentes podem comprar créditos de carbono no mercado. Entretanto, essa prática de compensação por meio da compra de créditos de carbono é controversa, pois não resolve o problema fundamental das empresas poluentes continuarem a emitir. É crucial que essas empresas também

tomem medidas concretas para reduzir suas emissões.

O crédito de carbono é uma unidade de medida que expressa a equivalência ao dióxido de carbono. Ele é utilizado para calcular a redução das emissões de gases de efeito estufa e seu potencial valor no mercado. Com base no Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential - GWP), todos os gases de efeito estufa são convertidos para a unidade "t CO₂e", ou seja, para a forma equivalente de dióxido de carbono. Quanto maior o potencial de um gás contribuir para o aquecimento global, maior será a quantidade representada em CO₂e. Países que reduzem suas emissões de gases de efeito estufa podem receber certificações de redução que se traduzem em créditos de carbono. Esses créditos podem ser gerados pela neutralização de uma tonelada de carbono não emitida. O país então recebe uma certificação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e pode comercializar esses créditos com países que não conseguiram reduzir suas emissões.

O mercado de créditos de carbono permite a compra e venda desses créditos entre empresas, investidores e governos. Ele contribui para a compensação de carbono por meio de ações que buscam neutralizar as emissões de dióxido de carbono na atmosfera, ajudando no combate ao aquecimento global e às mudanças climáticas resultantes dele. Esse mercado surgiu como uma alternativa ao estabelecimento da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC). Um acordo internacional foi negociado no Protocolo de Kyoto de 1997, com o objetivo de estabelecer metas de emissões de CO₂ entre os países. O mercado de créditos de carbono foi implantado e regulamentado em 2005, sendo iniciado pela proposta da Organização das Nações Unidas (ONU) chamada Clean Development Mechanism (CDM). Apesar de ser um mercado regulamentado, sua implementação varia em diferentes países. Alguns projetos de créditos de carbono são desenvolvidos principalmente para venda e lucro, o que tem levado à baixa adesão ao sistema. Em tais casos, a compensação de carbono através de créditos é realizada internamente, muitas vezes por empresas especializadas que calculam as emissões de gases de efeito estufa em termos de equivalente de dióxido de carbono.

Essas empresas então oferecem ações ambientais, como o plantio de árvores ou investimentos em energias renováveis. Existem dois tipos principais de mercado de créditos de carbono: o regulamentado e o voluntário. No mercado regulamentado, é adotado o sistema Cap and Trade, com regulamentações em níveis regionais e estaduais. O mercado voluntário envolve empresas ou indivíduos que compram créditos de carbono para reduzir ou neutralizar suas pegadas de carbono. Independentemente do tipo de mercado de créditos de carbono, essa abordagem é crucial para mitigar as mudanças climáticas. De acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), o progresso em investimentos e ações para combater as mudanças climáticas é lento, e ainda há muito a ser feito para alcançar a meta global de limitar o aquecimento global a 1,5°C.

4.2.1 Cap and Trade

O mercado brasileiro de créditos de carbono foi regulamentado por meio do sistema Cap and Trade, que tem como objetivo controlar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) através da precificação e comercialização. Embora o Cap and Trade seja mais predominante no mercado europeu com base nas metas de redução de emissões estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto, ele também tem sido implementado em outros países como Austrália, Nova Zelândia, Estados Unidos e Nova Gales do Sul. A origem do Cap and Trade remonta a uma estratégia empregada nos Estados Unidos para combater a chuva ácida, resultado da poluição por dióxido de enxofre (SO₂). As empresas poluidoras foram submetidas a cobranças e, como resultado, a incidência de chuvas ácidas diminuiu.

O funcionamento desse método envolve a imposição governamental de um limite de emissões de carbono (conhecido como "cap") para o país. Esse limite é dividido entre as empresas sob a forma de licenças ou cotas, onde cada unidade representa uma tonelada de carbono equivalente. Essas licenças são atribuídas às empresas de forma gratuita ou por meio de leilões. Isso incentiva empresas com maiores emissões a adquirirem licenças de empresas com menores emissões, possibilitando a venda de licenças excedentes por parte das empresas que reduzirem suas emissões ("trade"). Anualmente, esse limite é reduzido, visando estimular a diminuição das emissões.

Empresas com necessidade de mais licenças têm a opção de compensar suas emissões por meio de créditos de carbono. Em caso de ultrapassagem do limite de emissões, as empresas podem ser sujeitas a taxas ou penalidades governamentais. A alocação gratuita de licenças pelo governo se baseia no histórico de emissões das empresas participantes e/ou em projeções de produção futura. Essa distribuição também pode ser utilizada como estratégia para evitar que determinadas empresas ultrapassem o limite total de emissões e para manter a competitividade de preços durante o período de implementação do programa. Dado que as empresas não têm limites rígidos para suas licenças, isso facilita a distribuição pelo governo e proporciona liberdade para compra e venda de licenças com base na oferta e demanda. Empresas receptoras das licenças têm a responsabilidade de medir e comunicar suas emissões de maneira precisa e abrangente. Além de reduzir as emissões de dióxido de carbono, esse sistema incentiva a adoção e investimento em tecnologias de baixo teor de carbono, tornando essas tecnologias mais acessíveis para diversos setores da sociedade. O modelo também abre oportunidades para empresas adotarem fontes de energia renovável.

No entanto, críticas ao modelo surgem devido à volatilidade dos preços das licenças. Essa volatilidade é influenciada por fatores como os preços dos combustíveis fósseis e de outros setores poluentes, o que afeta investimentos e compromete a eficácia do Cap and Trade. Além disso, há o risco de distribuição desigual de licenças devido a interesses políticos, levando à isenção de certas empresas, como exemplificado pela Alemanha, que isentou a indústria do carvão, a maior fonte de emissões do país.

No contexto brasileiro, a maior parte dos serviços de compensação de carbono provém de agricultores e áreas de conservação. No entanto, a maior parte da remuneração é direcionada a empresas de consultoria, em detrimento dos fornecedores. Ademais, o sistema é questionado por desviar a atenção do problema climático, argumentando que os recursos investidos nesse sistema poderiam ser melhor alocados em soluções concretas.

4.3 CARBONO EQUIVALENTE

O conceito de "carbono equivalente" foi desenvolvido para representar todos os gases de efeito estufa (GEE) em uma única unidade, facilitando a operação do mercado de créditos de carbono. Isso inclui gases como o metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozônio (O₃) e clorofluorcarbonos (CFCs). O termo "equivalente" implica algo que tem o mesmo significado, valor ou que pode ser intercambiável. Portanto, "carbono equivalente" é uma forma de unificar todos os GEE em termos de dióxido de carbono (CO₂). Isso é feito para tornar esses gases comparáveis ao CO₂. Para realizar a conversão dos diferentes gases para CO₂, é necessário usar o Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential - GWP).

O GWP dos GEE está relacionado à capacidade de cada gás em reter calor na atmosfera (ou seja, sua eficiência radiativa) ao longo de um determinado período (geralmente 100 anos), comparada à capacidade do CO₂ em reter calor. A fórmula para calcular o carbono equivalente envolve multiplicar a quantidade de um determinado gás pelo seu GWP. O site Greenhouse Gas Protocol disponibiliza tabelas com os valores de GWP para diferentes GEE. Ao consultar essas tabelas, é possível determinar o valor de carbono equivalente para cada tipo de gás.

4.4 NEUTRALIZAÇÃO DE CARBONO

A pegada de carbono, também conhecida como "carbon footprint," é uma metodologia desenvolvida para mensurar as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Por exemplo, um prato que inclui alimentos de origem animal, como arroz e feijão, apresenta uma pegada de carbono significativa devido aos diversos processos envolvidos, como plantio, cultivo e transporte. É crucial compreender as fontes de emissão de dióxido de carbono para orientar ações que reduzam tais emissões, desacelerem o aquecimento global, aprimorem a saúde do planeta e evitem o "overshoot," que se refere ao excesso de pressão sobre a capacidade da Terra. Para lidar com emissões inevitáveis, existem projetos ambientais certificados que permitem a compensação. Nesse contexto, a mesma quantidade de dióxido de carbono emitida por empresas, produtos, eventos ou indivíduos é compensada pelo uso de tecnologias limpas.

A neutralização de carbono é uma abordagem que visa mitigar os

desequilíbrios causados pelo aumento das emissões de gases poluentes do efeito estufa. Isso envolve calcular a emissão de carbono e, para neutralizá-la, é necessário remover o equivalente de CO₂e (carbono equivalente) da atmosfera, o que envolve o sequestro de carbono. Globalmente, medidas estão sendo implementadas legalmente ou de forma voluntária para minimizar as emissões de GEE.

A quantificação das emissões de dióxido de carbono pode ser realizada para pessoas físicas, empresas, produtos e governos. Calculadoras estão disponíveis para estimar as emissões de CO₂ de indivíduos com base em informações sobre consumo. Para cálculos mais complexos, empresas especializadas podem conduzir inventários de emissões de carbono. Com esses dados, é possível identificar áreas de alta emissão, alto consumo de veículos ou maiores emissões relacionadas a processos produtivos. Após a avaliação, é estabelecido o objetivo de neutralização de carbono. Medidas são adotadas para minimizar a geração de CO₂, como o uso de materiais reciclados ou a reutilização de insumos e materiais por empresas industriais.

Entre os mecanismos usados para a neutralização de carbono, os mais comuns incluem o plantio de árvores nativas e a compra de créditos de carbono no mercado. Outro exemplo é a neutralização de carbono em eventos, onde uma empresa especializada calcula as emissões geradas, incluindo aquelas provenientes do uso de veículos, viagens aéreas, energia consumida e resíduos produzidos durante o evento. Com base nesses dados, projetos ambientais são apoiados.

Essa abordagem funciona da seguinte forma: uma empresa A emite cinco toneladas de carbono em suas atividades. Para compensar essas emissões, ela deve comprar cinco créditos de carbono (cada crédito representa uma tonelada de carbono equivalente). Assim, a empresa pode colaborar com empresas confiáveis e certificadas, como a hipotética empresa B, que capta biogás de aterros sanitários e o transforma em energia, ou a empresa C, que realiza a preservação e o reflorestamento de florestas nativas. Essas empresas geram créditos de carbono através de práticas sustentáveis, e uma parceria é estabelecida onde uma empresa compra créditos para neutralizar suas emissões, enquanto a outra recebe investimentos.

Existem diversas técnicas de remoção de dióxido de carbono (carbon dioxide removal - CDR) para alcançar a neutralização de carbono. Isso inclui a captura e o

armazenamento de carbono (CCS), que envolve a coleta direta de CO₂ do ar ou antes de sua liberação na atmosfera; o sequestro de CO₂ pelo solo através de reflorestamento e manejo adequado do solo; o sequestro de CO₂ pelos oceanos por meio da fertilização oceânica, que promove o crescimento biológico e a conversão do CO₂ atmosférico em carbono estável; a aceleração de processos naturais como o intemperismo de rochas ricas em silicatos, que reagem com o CO₂ atmosférico e o convertem em formas estáveis; a adoção de energias renováveis; e o sequestro de CO₂ da atmosfera por meio da vegetação.

Embora existam certificações emitidas por organizações, como Carbon Free e Carbono Neutro, ainda não há um certificado nacional ou globalmente padronizado. Qualquer pessoa pode buscar neutralizar suas emissões, mas é crucial focar na não geração de emissões como a abordagem fundamental, enquanto a neutralização atua como uma medida paliativa. Cientistas alertam que a temperatura global não pode aumentar mais do que 2°C até o final do século. No entanto, estimativas do IPCC indicam que, para atingir esse objetivo, as emissões de carbono equivalente (CO₂e) precisam ser reduzidas entre 40% e 70% até 2050, chegando próximo a zero até 2100.

5 PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS NA CONSTRUÇÃO DA CAMADA DE REVESTIMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Diante da necessidade de enfrentar os desafios ambientais originados pelos processos de fabricação de misturas asfálticas e, conseqüentemente, mitigar ou transformar as emissões de gases de efeito estufa (GEE), surgem de forma constante abordagens inovadoras para a pavimentação. Esses enfoques incorporam projetos que valorizam a reciclagem, o reaproveitamento de materiais, a permeabilidade e a redução correlata da poluição.

Uma dessas soluções já implementadas é o Concreto Asfáltico Permeável, uma prática sustentável existente no campo da pavimentação. Embora não esteja diretamente ligado à redução das emissões de GEE, esse tipo de pavimento tem se mostrado eficaz. Ele melhora a aderência dos veículos, minimizando os riscos de aquaplanagem, diminuindo a distância de frenagem e ampliando a visibilidade noturna. A composição da mistura asfáltica permeável é similar à convencional, porém com uma diferença crucial: a variedade permeável, também conhecida como asfalto poroso, possui espaços vazios em sua estrutura que permitem a passagem da água. Sob a camada de revestimento asfáltico poroso, uma camada espessa de material altamente poroso, como brita fina, é disposta. Além disso, um sistema de drenagem é instalado para permitir que a água infiltrada percole por meio desse sistema e seja direcionada para destinos específicos, como cursos d'água naturais ou centrais de armazenamento.

Essa abordagem de pavimentação oferece a vantagem de contribuir para o controle de enchentes, uma vez que é capaz de absorver uma parte substancial da água da chuva, mantendo-a retida por mais tempo. Isso resulta em um fluxo reduzido nos cursos d'água, prevenindo enchentes e minimizando alagamentos. No entanto, é importante destacar que esse tipo de pavimento ainda não é adequado para áreas com tráfego intenso devido à sua resistência limitada. Além disso, seu custo é aproximadamente 25% mais alto do que o asfalto convencional.

Outra estratégia sustentável é a reciclagem de pavimentos, um processo que envolve a reutilização de misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas para criar novos materiais de pavimentação. Isso resulta em economia de recursos, finanças e energia, além de contribuir para a resolução do problema do descarte de resíduos gerados durante os processos de restauração. Diferentes técnicas de reciclagem

são empregadas, incluindo fresagem, reciclagem a frio in situ, reciclagem completa e reciclagem a quente em usina.

Uma inovação promissora diz respeito aos bioligantes, que são ligantes asfálticos derivados do processamento de material vegetal, contrastando com os ligantes convencionais provenientes do refino de petróleo. Estudos foram conduzidos para caracterizar a reologia desses bioligantes e analisar o comportamento mecânico das misturas resultantes. Uma avaliação comparativa entre os bioligantes e um ligante convencional CAP 30/45 foi realizada com base em propriedades reológicas e químicas. Resultados de ensaios indicam que os bioligantes apresentam módulos de cisalhamento dinâmico elevados em altas frequências, porém são semelhantes ao asfalto convencional em frequências mais baixas. Evidências apontam que os bioligantes podem oferecer boa resistência à deformação permanente, semelhante à dos ligantes asfálticos convencionais. Além disso, estudos reológicos sugerem que os bioligantes podem apresentar menor vida de fadiga. Esses bioligantes podem ser obtidos através de processos não termoquímicos, como a extração de lignina de madeira, óleos vegetais e resinas de seiva.

Em relação à busca por fontes de energia mais limpas e renováveis, pesquisas têm sido conduzidas para desenvolver alternativas sustentáveis para a geração de energia, priorizando recursos menos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. Diferentes abordagens, como processos termoquímicos, liquefação e pirólise, têm sido exploradas para a produção de ligantes alternativos ao asfalto convencional, conhecidos como bioligantes, biobetume, bioasfalto, entre outros termos. Uma inovação recente é o estudo da adição de óleo vegetal a misturas asfálticas tradicionais, ainda em fase de testes, liderado pelo engenheiro Christopher Williams, da Universidade do Estado de Iowa. Esse "asfalto verde" ou bioasfalto, é produzido por meio de um processo termoquímico chamado pirólise rápida, que utiliza biomassa para criar um óleo vegetal líquido usado na fabricação de misturas asfálticas e outros produtos. Esse processo também gera biocarvão, um carvão vegetal que pode ser empregado para melhorar a qualidade do solo e retirar gases de efeito estufa da atmosfera. O bioasfalto permite a substituição parcial de óleos derivados de biomassa por óleos à base de petróleo em misturas asfálticas, tornando-o uma alternativa promissora e sustentável.

Em resumo, as estratégias voltadas para a pavimentação sustentável, como o

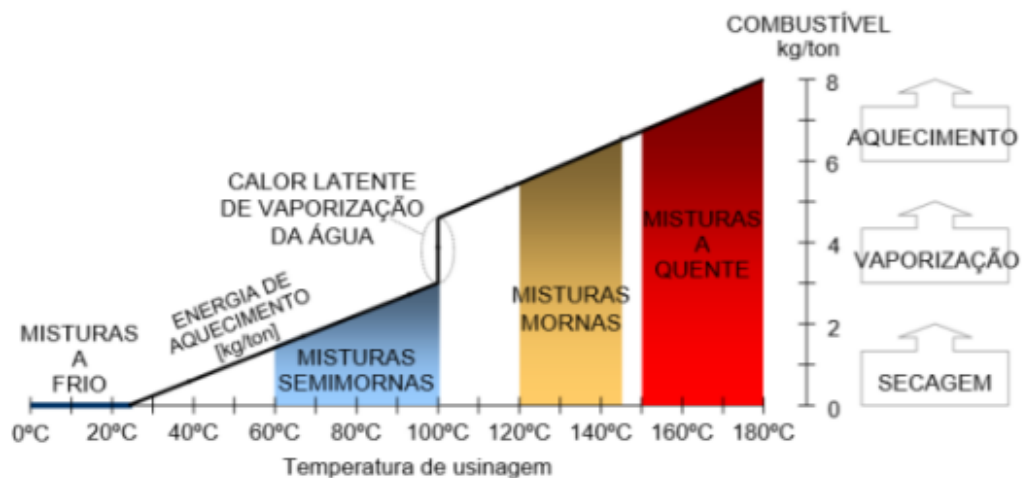
Concreto Asfáltico Permeável, a reciclagem de pavimentos e o desenvolvimento de bioligantes e bioasfalto, refletem uma abordagem proativa na redução de emissões de GEE, minimização do impacto ambiental e promoção de práticas mais responsáveis na construção de infraestruturas viárias.

5.1 CARACTERÍSTICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS E SEMIMORNAS

As misturas asfálticas mornas e semimornas emergem como uma alternativa para mitigar os efeitos adversos resultantes do aquecimento das misturas asfálticas tradicionalmente usadas na camada superficial dos pavimentos de asfalto, conforme abordado anteriormente neste estudo. A elevação da temperatura dessas misturas é associada ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e à geração de fumos de asfalto durante o processamento, que constituem riscos tanto para a saúde dos operadores quanto para o meio ambiente.

Uma estratégia eficaz para minimizar os impactos dos fumos provenientes das misturas asfálticas envolve, justamente, a redução das temperaturas empregadas nas etapas de processamento, transporte e compactação. No entanto, essa redução não pode ser realizada de forma arbitrária, considerando que a temperatura desempenha um papel crucial na qualidade final da mistura. Portanto, a diminuição da temperatura é alcançada por meio da aplicação de técnicas ou da incorporação de aditivos na mistura asfáltica. O objetivo é obter, em temperaturas mais baixas, as mesmas propriedades de uma mistura convencional de temperatura elevada. Assim, surgem as misturas asfálticas mornas e semimornas. A Figura 10 ilustra as faixas de temperatura associadas a essas misturas asfálticas.

Figura 10 - Temperatura de usinagem das misturas asfálticas



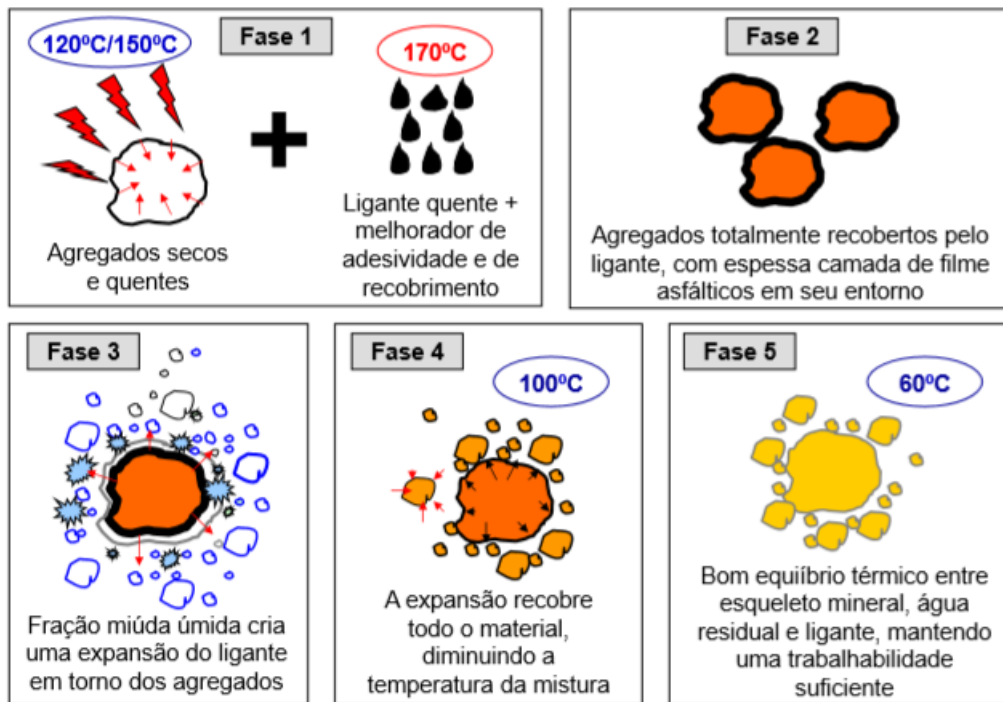
Fonte: MOTTA, 2011.

Em 1956, Csanyi fez uma descoberta sobre a mistura asfáltica quente, revelando que a incorporação de vapor resultava em uma espuma de asfalto útil para a estabilização de solos. Mais tarde, em 1968, a Mobil Oil Australia, ao adquirir os direitos dessa técnica, substituiu o vapor de asfalto por uma pequena quantidade de água fria, marcando um marco significativo na sua evolução. Esse método, amplamente reconhecido por sua aplicação na reciclagem de pavimentos, utiliza água para gerar a espuma de asfalto, seja através da umidade natural dos agregados ou por meio de um material hidrofílico. Quando a água é introduzida na mistura asfáltica aquecida, ela se transforma em vapor, expandindo o ligante e, conseqüentemente, diminuindo sua viscosidade.

Uma técnica relacionada é o processo de Low Energy Asphalt® (LEA®), uma tecnologia de mistura semimorna desenvolvida na França. Nesse método, a água necessária para a formação da espuma de asfalto é incorporada por meio da umidade presente na fração miúda dos agregados. O processo LEA® é dividido em cinco fases distintas: primeiro, os agregados graúdos passam por um processo de secagem utilizando calor a uma temperatura mais baixa, entre 120°C e 150°C, do que a temperatura convencional. Em seguida, o ligante é aquecido a 170°C e misturado com um aditivo para melhorar sua adesividade. Na segunda fase, os agregados aquecidos são misturados, resultando em agregados graúdos revestidos

por uma fina camada de mistura asfáltica. A terceira fase consiste na incorporação dos agregados miúdos na mistura, adicionando de 3 a 4% de água à temperatura ambiente. A interação entre os agregados miúdos úmidos e a mistura asfáltica quente provoca o espumamento e a expansão do ligante. Na quarta fase, a expansão do ligante leva à redução da temperatura média da mistura, chegando a cerca de 100°C. Por fim, na quinta e última fase, o sistema atinge o equilíbrio térmico, permitindo que a mistura seja aplicada em campo a uma temperatura próxima de 60°C. Para uma visualização simplificada das etapas do processo LEA®, consulte a Figura 11.

Figura 11 - Etapas do processo LEA® para misturas mornas



Fonte: MOTTA, 2011.

Uma alternativa adicional para produzir misturas mornas é por meio da introdução de aditivos orgânicos na mistura asfáltica. Ao incorporar esses aditivos e aquecer o ligante acima do ponto de amolecimento do aditivo, ocorre uma modificação na viscosidade do ligante. No entanto, a seleção do tipo de aditivo orgânico e a quantidade a ser adicionada à mistura são parâmetros cruciais para garantir um desempenho adequado. A escolha inadequada do material ou o excesso do mesmo pode levar a uma redução excessiva da viscosidade ou à rigidez

excessiva da mistura, potencialmente causando trincas.

Esses aditivos podem ser incorporados previamente à mistura ou durante o processo de produção. Além de reduzir a temperatura de produção em até 30 ou 40°C, quando a mistura asfáltica é resfriada, os aditivos orgânicos cristalizam, aumentando a rigidez geral da mistura. Portanto, uma mistura adequadamente formulada com aditivos orgânicos pode resultar em melhorias na resistência contra afundamento permanente.

Dentre as tecnologias que empregam aditivos orgânicos, destaca-se o SASOBIT®, uma cera parafínica desenvolvida pela empresa alemã Sasol Wax GmbH. Essa cera é comercializada em forma de flocos ou pastilhas, conforme ilustrado na Figura 16. Conforme relatado por MOTTA (2011), os flocos são incorporados diretamente ao ligante, enquanto as pastilhas são misturadas à composição asfáltica.

Figura 12 - Cera parafínica em flocos (esquerda) e em pastilhas (direita), para a produção de misturas mornas



Fonte: Hurley e Prowell, 2005.

Certos aditivos surfactantes têm a função de atuar como aprimoradores da adesividade, facilitando o processo de revestimento dos agregados pelo ligante asfáltico. Esses aditivos não afetam características como a viscosidade, penetração e ponto de amolecimento do ligante asfáltico. Em outras palavras, uma vez que um dos objetivos do aquecimento do ligante é possibilitar que ele cubra eficazmente os agregados, o uso de surfactantes torna possível alcançar essa cobertura em temperaturas mais baixas.

O Cecabase RT® e o GEMUL XT14 são exemplos de aditivos líquidos surfactantes, originados de empresas francesas e brasileiras, respectivamente. A incorporação desses aditivos permite uma redução na temperatura de produção em cerca de 30°C, com uma proporção habitual de 0,2 a 0,5% em massa do ligante. Já o EVOTHERM™, por exemplo, é capaz de diminuir a temperatura de produção de 50 a 75°C em relação às misturas asfálticas convencionais.

A diminuição da temperatura de produção acarreta benefícios ambientais, visto que resulta em menor consumo energético nas usinas. Uma das fases com maior demanda de combustíveis fósseis nas usinas é o aquecimento para secar os agregados, portanto, a redução nesse processo traz vantagens significativas. Conforme apontado por Hurley e Prowell (2008), a implementação de misturas mornas pode levar a uma economia de aproximadamente 20 a 35% no consumo de combustíveis.

5.2 O “ASFALTO BORRACHA”

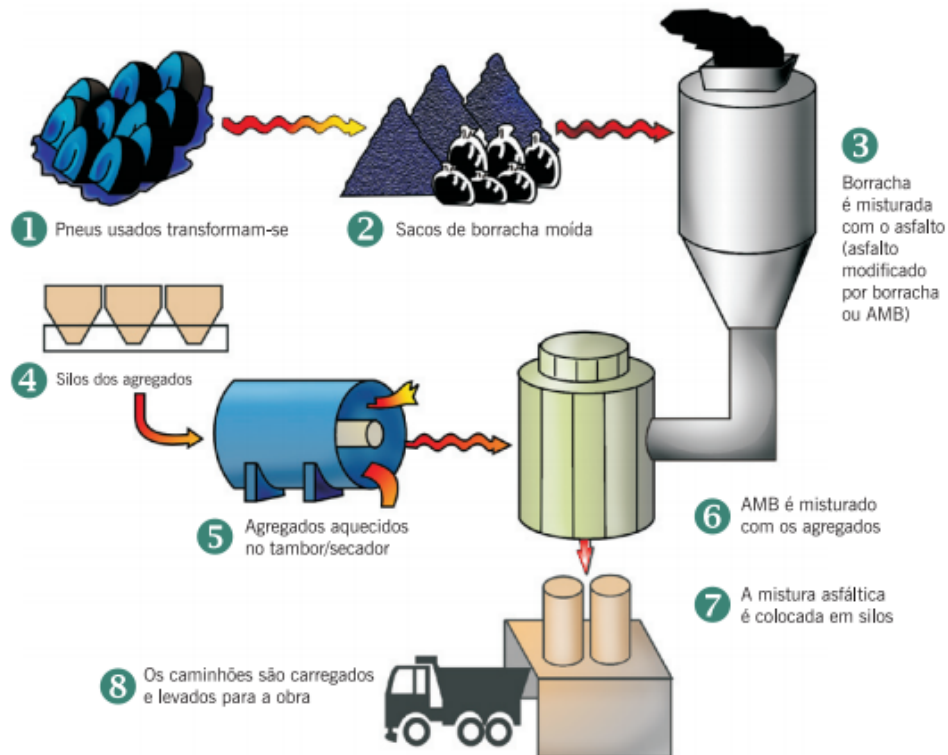
A reutilização de pneus começou a ser investigada em várias dimensões, com o intuito de beneficiar a indústria e reduzir os resíduos ambientais. Um dos métodos empregados é a recuperação granular, que envolve a trituração e moagem da borracha de pneu, resultando em resíduos com granulometria específica adequada para reaproveitamento, notavelmente na Engenharia Civil, como na pavimentação. Conforme indicado pela ANTT e CCR (2017), durante o processo de trituração, a granulometria da borracha varia de 460 mm a 13 mm, e após a moagem, pode atingir dimensões de até 0,3 mm, transformando-se em pó de borracha.

De acordo com a ANTT e CCR (2017), a introdução inicial da borracha na pavimentação ocorreu em 1930, utilizada para selagem e manutenção de pavimentos. Na década de 60, o engenheiro e pesquisador Charles McDonald estava em busca de materiais asfálticos que exibissem flexibilidade satisfatória em temperatura ambiente. A borracha moída de pneus demonstrou características elásticas promissoras. McDonald observou que a mistura asfáltica com a adição de borracha revelava propriedades excelentes quando produzida em altas temperaturas. Seus experimentos permitiram estabelecer que um asfalto modificado por borracha deveria conter no mínimo 15% de massa de borracha, a fim de obter a

viscosidade e elasticidade requeridas. Ademais, a temperatura ideal deveria ser de 177°C, com um tempo mínimo de mistura de 45 minutos, visando otimizar a produção. Segundo Bernucci et al (2008), a primeira aplicação de asfalto modificado por borracha no Brasil ocorreu em agosto de 2001, na BR 116/RS.

A incorporação de borracha em misturas asfálticas pode ser realizada por meio de dois métodos: processo úmido (Wet Process) e processo seco (Dry Process). No primeiro método, a borracha é triturada e moída, sendo então adicionada ao cimento asfáltico de petróleo (CAP) em temperaturas elevadas. Já no segundo método, a borracha triturada é introduzida na mistura asfáltica como parte dos agregados, sendo denominada agregado-borracha. No Brasil, o processo úmido é mais predominante e é detalhado na norma DNIT 111/2009.

O ligante asfáltico modificado pelo processo úmido é classificado com base em seu processo de fabricação, determinando se é estocável ou não. O sistema de armazenamento, conhecido como Terminal Blending e ilustrado na Figura 17, envolve a mistura de partículas finas de borracha moída (passantes na peneira de número #40) com o ligante, mantendo-se uma temperatura elevada. Isso resulta em um material homogêneo e estável. No Terminal Blending, a borracha é incorporada ao ligante através de agitação em temperaturas superiores a 177°C.

Figura 13 - Etapas do processo de *Terminal Blending*

Fonte: Bernucci et al, 2008.

De acordo com Aderlrahman e Carpenter (1999), a uma temperatura mais baixa, em torno de 160°C, ocorre a expansão das partículas através da absorção dos maltenos pela borracha. A uma temperatura mais elevada, cerca de 240°C, ocorrem reações químicas que resultam na desvulcanização e despolimerização da borracha.

Como mencionado previamente, o asfalto borracha foi inicialmente desenvolvido visando a obtenção de misturas asfálticas altamente flexíveis. No entanto, sua utilização passou a ser encarada como uma resposta para a reutilização de pneus descartados, tornando-se uma opção ecologicamente consciente. Importante salientar que a produção do asfalto borracha exige temperaturas elevadas (por volta de 240°C) para efetuar a desvulcanização e despolimerização. Esse aumento de temperatura e tempo de produção resulta em um aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), devido ao maior consumo de combustíveis fósseis. Além disso, o aquecimento do material asfáltico resulta na formação de fumos de asfalto, que podem ser prejudiciais à saúde.

Além disso, o processo conhecido como Terminal Blending utiliza agitação de alto cisalhamento. Conforme LaRoche et al (2008), a velocidade de agitação está diretamente relacionada com a emissão de compostos orgânicos totais, alguns dos quais são considerados cancerígenos.

Portanto, embora o asfalto borracha contribua para a preservação ambiental ao incorporar um material anteriormente descartado, seu processo de produção resulta em um aumento das emissões de GEE. Por conseguinte, não pode ser classificado como uma solução totalmente ecológica. No âmbito estrutural, o asfalto borracha pode ser uma opção vantajosa para substituir misturas asfálticas convencionais, devido à sua resistência superior a defeitos, como fadiga e deformações permanentes, o que pode resultar em redução dos custos de manutenção do pavimento.

6 PEGADA DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

Aproximadamente um quarto das emissões de gases de efeito estufa (GEE) do planeta têm origem nos setores da construção civil. Cerca de um terço desse total está associado às obras de infraestrutura, que incluem a pavimentação asfáltica. Esta última contribui com cerca de 30% das emissões resultantes da construção de uma rodovia.

Durante o evento Paving Expo 2023, que ocorreu nos dias 24, 25 e 26 de maio de 2023, em São Paulo, Brasil, foram discutidas estratégias e técnicas voltadas para a redução do impacto ambiental decorrente das emissões de gases provenientes do setor de infraestrutura. A Petrobras, em colaboração com especialistas da Coppe/UFRJ, Ecorodovias e Grupo CCR, destacou que a pavimentação asfáltica apresenta atualmente a capacidade de diminuir em até 65% suas emissões de GEE. Foi enfatizado que, além das inovações tecnológicas, a participação ativa do setor é crucial para atenuar a pegada de carbono.

No que diz respeito às tecnologias, a Petrobras divulgou em primeira mão dois lançamentos no campo das misturas asfálticas: o CAP AP e o CAP Pro, ambos desenvolvidos com o propósito de reduzir a emissão de carbono pelo setor.

6.1 O CAP PRO

O CAP Pro é um sistema inovador de mistura asfáltica morna, especialmente desenvolvido para aplicação em temperaturas reduzidas. Este cimento asfáltico de petróleo apresenta a promessa de reduzir significativamente o consumo energético, ou seja, diminuir a utilização de combustíveis, durante todas as fases de sua produção, incluindo a fabricação, o processo de pavimentação e ao longo da vida útil do pavimento. Sua formulação foi elaborada com o propósito de permitir sua produção completa em refinarias e posterior envio direto para os locais de construção.

Segundo o consultor Herrmann da Petrobras, o CAP Pro é especificado com a designação CPD 30/45, acompanhado por um aditivo químico que viabiliza a redução das temperaturas de produção e compactação em até 40 graus Celsius,

sem comprometer o desempenho das vias. Acrescentou ainda que a adoção do CAP Pro não requer alterações nos processos e equipamentos utilizados na pavimentação. Essa substancial redução na temperatura de processamento traz consigo o benefício adicional de diminuir em até 65% a intensidade de carbono presente na mistura asfáltica, quando comparado ao tradicional CAP 30/45 empregado em temperaturas mais elevadas. Adicionalmente, o CAP Pro demonstra maior resistência ao dano causado pela umidade, resultando em um nível inferior de envelhecimento. Observou-se que a cada aumento de 10 graus Celsius no processo de usinagem, o envelhecimento da mistura asfáltica dobra.

Outra vantagem considerável é a capacidade de aumentar a proporção de RAP (mistura asfáltica reciclada) em até 35%, além de permitir a redução ou eliminação do uso de cal, que tem um impacto substancial na contabilização das emissões. Segundo Herrmann, estima-se que a aplicação de 1 tonelada de CAP Pro seja capaz de evitar a emissão de 110 kg de CO₂ equivalente, em comparação com as misturas asfálticas tradicionais produzidas a altas temperaturas.

Conforme destacou Herrmann, "sustentabilidade não é possível sem eficiência". O CAP Pro exibe um índice de Ensaio de Dano por Umidade Induzida (DUI) de 77%, enquanto as misturas tradicionais na mesma faixa, classificadas como CAP 30/45 e utilizando os mesmos tipos de agregados, atingem 55% de DUI. Além disso, o fator de fadiga da mistura CAP Pro é de 30% a 35% menor. Previsto para ser lançado no mercado em outubro de 2023, o CAP Pro apresenta-se como uma promissora iniciativa para ampliar a descarbonização das técnicas de pavimentação.

6.2 O CAP AP

No Paving Expo 2023, a Petrobras também apresentou o CAP AP, um cimento asfáltico de alta penetração da faixa 70/85. Esse cimento é considerado ideal para misturas que contêm um maior teor de mistura asfáltica reciclada (RAP). O CAP AP é formulado sem aditivos e sua composição química o torna especialmente adequado para promover uma maior incorporação de mistura asfáltica reciclada, alcançada por meio de ajustes nos processos de refino e na seleção de dosagem do diluente. Herrmann, consultor da Petrobras, explicou que o

CAP AP encontra-se atualmente em processo de homologação junto à Agência Nacional de Petróleo e, em breve, estará disponível para comercialização.

Mercados mais desenvolvidos, como o dos Estados Unidos, onde o uso de RAP atinge 80% nas misturas asfálticas, já adotaram amplamente essa prática. No Brasil, com a introdução do CAP AP pela Petrobras, acredita-se que haverá uma expansão significativa dessa abordagem. Assim como o CAP Pro, o CAP AP será produzido na Refinaria da Petrobras (Revap), localizada em São José dos Campos, São Paulo. Espera-se, portanto, que essa iniciativa contribua para o objetivo de alcançar a neutralização do carbono na indústria de pavimentação até o ano de 2045.

6.3 FONTE RENOVÁVEL DE ENERGIA ATRAVÉS DA CASCA DO ARROZ

A pesquisadora Sandra Einloft, vinculada à Escola Politécnica de Porto Alegre, deu início a um estudo intitulado "Desenvolvimento de Novos Materiais para Separação de CO₂ em Processos Industriais e Campos de Gás Natural". O propósito dessa pesquisa é explorar alternativas visando mitigar e reverter as emissões de dióxido de carbono na atmosfera. O foco está na criação de soluções para separar esse composto químico proveniente de fontes poluentes, enquanto se aproveita para a produção de outros produtos de valor.

Ao isolar o CO₂, torna-se possível convertê-lo em produtos de utilidade prática, como aditivos para combustíveis, exemplificado pelo dimetilcarbonato, frequentemente empregado para reduzir emissões de fuligem e poluição no diesel. Parte das emissões de dióxido de carbono provém de correntes gasosas industriais, como o gás natural utilizado como combustível veicular (GNV). Segundo Sandra, essa pesquisa contribui para a mitigação do aquecimento global e a minimização de resíduos, ao revalorizar materiais que, de outra forma, seriam descartados.

No âmbito desse estudo, a casca de arroz, principal subproduto da indústria cerealista, é empregada para produzir sílicas modificadas. Esses materiais são utilizados na separação de CO₂ proveniente de usinas de geração de energia, resultando em um gás natural mais limpo. O processo converte o CO₂ em substâncias de utilidade, ao mesmo tempo em que agrega valor a resíduos abundantes e de baixo custo.

Sandra enfatiza que essa conversão do dióxido de carbono é um processo químico desafiador, uma vez que o CO₂ é notoriamente estável. A sílica, extraída da casca de arroz, desempenha um papel crucial, permitindo uma abordagem mais sustentável. Suas moléculas de oxigênio e hidrogênio em sua superfície possibilitam a separação do CO₂ de outros gases, através de modificações.

Espera-se que esse estudo possa contribuir para enfrentar as consequências das atividades humanas e da exploração excessiva dos recursos naturais do planeta. Além disso, o estudo propõe a aplicação das sílicas modificadas, derivadas da casca de arroz, na separação de CO₂ em usinas de produção de energia, e sugere que o gás natural, mais limpo após esse processo, possa ser usado como combustível nas etapas de produção, transporte e construção de pavimentos asfálticos.

Ademais, em combinação com o uso de outras misturas asfálticas como o CAP Pro e o CAP AC, lançados pela Petrobras, que são produzidos em temperaturas mais baixas (misturas asfálticas mornas e semimornas), essa proposta poderia contribuir para reduzir a pegada de carbono proveniente do setor de infraestrutura, especialmente na pavimentação asfáltica. Uma sugestão adicional é estabelecer critérios para a certificação de pegada de carbono e compensações de carbono equivalente em usinas de mistura asfáltica, incentivando seu envolvimento no mercado de créditos de carbono.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica a respeito dos impactos ambientais gerados na construção dos pavimentos e na produção de insumos para tal, especialmente a mistura asfáltica, no que se refere às emissões de gases do efeito estufa (GEE). Além disso, foi apresentado um panorama geral sobre gases de efeito estufa, pegada de carbono, mercado de créditos de carbono, carbono equivalente e compensações de carbono, funcionamento de usinas de mistura asfáltica e práticas sustentáveis na fabricação de mistura asfáltica, relacionados ao setor de infraestrutura, mais especificamente, da pavimentação asfáltica.

Com essa pesquisa, objetivou-se apresentar soluções atenuantes dos impactos negativos causados pelas emissões de GEE, especialmente o dióxido de carbono, ou gás carbônico, advindas de processos de produção das misturas asfálticas utilizadas na camada de revestimento do pavimento asfáltico.

Durante muito tempo, o homem não tinha meios para se deslocar de um local a outro e/ou transportar quaisquer objetos. Em certo período, passou-se a utilizar animais para transporte e, posteriormente, foi inventada a roda, que permitiu o aparecimento das carretas primitivas. No século XVIII, com o invento da máquina a vapor, apareceram os primeiros meios mecânicos de transporte. Durante um século, a ferrovia se expandiu e se manteve como único meio “moderno” e eficiente de transporte até o aparecimento de veículos motores, no início do século XX. Cerca de 20 anos mais tarde, houve o aparecimento do meio de transporte por via aérea.

As rodovias destacam-se por atingirem um maior número de usuários e promoverem retorno mais rápido do investimento público. Elas demandam menor especialização e menores investimentos em terminais, embora necessitem de operações com alto custo. Ao pavimentar, a dirigibilidade aumenta, porém o aumento dos impactos ambientais se torna preocupação. Entre os impactos negativos, destaca-se a emissão de carbono. A malha rodoviária, além de fornecer mobilidade para a sociedade, contribui significativamente nos impactos ambientais, tanto durante a construção de uma estrada, quanto na sua operação e manutenção.

A partir do desenvolvimento desta pesquisa, pode-se concluir que os mercados de créditos de carbono podem atenuar as mudanças climáticas devido às emissões de GEE. Uma técnica comum que está ganhando espaço é a

neutralização de carbono por meio de energias alternativas. A geração de energia é uma grande emissora de carbono em termos globais, e, portanto, substituir energias convencionais por fontes de energia limpas é uma atitude eficiente de compensar as emissões de carbono.

Além disso, a Petrobras trabalha no desenvolvimento de novos tipos de mistura asfáltica, que devem ser comercializados ainda neste ano de 2023 no Brasil. São eles: CAP Pro e CAP AP, que possuem o diferencial de serem misturas asfálticas mornas, ou seja, fabricadas sob menores temperaturas, mantendo as propriedades de desempenho, contribuindo para a diminuição das emissões gasosas no meio ambiente e evitando o aparecimento dos fumos do asfalto, sendo, assim, mais eficiente e sustentável. Com a redução da temperatura, também há economia de energia na construção das estradas. Outro benefício é o melhor aproveitamento dos recursos naturais, visto que esses CAPs podem receber quantidades maiores de materiais reciclados na sua composição. De acordo com a Petrobras, o CAP PRO pode ter emissões de carbono até 65% menores em comparação com a mistura asfáltica tradicional, misturada a quente.

Através de um estudo feito pela pesquisadora Sandra Einloft, em que se utiliza a casca de arroz para produzir sílicas modificadas, que são utilizadas para separar o gás carbônico emitido em usinas de produção de energia, conclui-se que o CO₂ pode ser transformado em materiais úteis, a partir de resíduos abundantes e disponíveis a baixo custo. Deixa-se a sugestão de estudar a aplicação dessa técnica nas usinas de produção de misturas asfálticas. O gás natural, menos poluente devido a esse processo, pode ser utilizado como combustível nas etapas de usinagem da mistura asfáltica, assim como no seu transporte e na construção dos pavimentos asfálticos.

A utilização de outros tipos de mistura asfáltica, produzidos a partir de misturas asfálticas mornas e semimornas, em conjunto com o que propõe a pesquisadora Sandra Einloft, poderiam formar uma das soluções para reduzir a pegada de carbono emitida pelo setor de infraestrutura, mais especificamente, da pavimentação asfáltica. Sequencialmente a isso, ressalta-se a necessidade de criação de uma certificação de pegada de carbono e de compensações de carbono equivalente para usinas de mistura asfáltica, para que elas possam se desenvolver no mercado de créditos de carbono.

O envolvimento da economia mundial na estabilização de mercados de créditos de carbono pode ser uma solução para atingir o equilíbrio de emissões. No entanto, é necessário garantir que as compras de compensação de carbono não substituam os esforços das empresas, especialmente, em setores altamente poluentes, para descarbonizar. E que, além disso, os sistemas de compensação não prejudiquem a importância de regulamentar diretamente as emissões de indústrias, por exemplo. Resumidamente, a compra de compensações de carbono não pode ser usada como subterfúgio para negligenciar a busca de alternativas efetivas para reduzir as emissões de carbono no mundo.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Deixa-se sugestões para trabalhos futuros na temática de preservação ambiental na área de infraestrutura, mais especificamente no âmbito das etapas de construção dos pavimentos. Por exemplo, estudar a aplicabilidade de diferentes materiais na camada de revestimento dos pavimentos e seu impacto na natureza do ponto de vista da emissão de gases poluentes na etapa de produção e construção. Dessa forma, pode-se objetivar a criação de modelos de pavimentos mais sustentáveis, mantendo a resistência mecânica solicitada para a sua utilização.

Além disso, permanece como sugestão para trabalhos futuros o aprofundamento da pesquisa acerca da certificação de crédito de carbono. A criação de questionários, baseados em critérios utilizados para certificação da pegada de carbono de diversos produtos internacionalmente, podem ser pensados e aplicados nas usinas de mistura asfáltica de uma região, a fim de coletar informações a respeito da preocupação ambiental na produção da mistura asfáltica, por exemplo, e, também, incentivar a busca por processos de produção e de construção mais limpos, reduzindo a emissão e/ou os impactos de gases do efeito estufa, como o gás carbônico.

8 REFERÊNCIAS

FERREIRA, Allan Nunes. A EMISSÃO DE CO₂ E O GASTO ENERGÉTICO NA MANUTENÇÃO DE RODOVIAS: UM ESTUDO NA BR 262. SALOMÃO, Pedro Emílio Amador. Environmental impacts generated by road construction and operation. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/5606/560662201027/html/>

PORTO ALEGRE. PUCRS. Estudo poderá auxiliar na redução de gás carbônico no meio ambiente. 2021. Disponível em: <https://www.pucrs.br/blog/estudo-podera-auxiliar-na-reducao-de-gas-carbonico-no-m-eio-ambiente/>. Acesso em: 25 maio 2023.

ARAÚJO, Marcelo Almeida; et. al. Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto). Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento, ANO 1. VOL. 10, Pp. 187-196. Novembro de 2016 - ISSN.2448-0959

PEREIRA, Mirian Carvalho. Revestimentos asfálticos: tipos e propriedades. 2014. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Formiga, Formiga, 2014. Disponível em: <https://repositorioinstitucional.uniformg.edu.br:21074/xmlui/handle/123456789/264> . Acesso em: 16 abr. 2023.

(IPCC), The Intergovernmental Panel On Climate Change. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 15 jun. 2023.

PROTOCOL, Ghg. Calculation Tools and Guidance. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-and-guidance>. Acesso em: 15 jun. 2023.

BERNUCCI, L.B; MOTTA, L.M.G; CERATTI, J.A.P; SOARES, J.B. “PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: FORMAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHEIROS”. 2ª edição. RIO DE JANEIRO, 2022.

MOTTA, R.D.S. ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS EM REVESTIMENTOS DE PAVIMENTOS PARA REDUÇÃO DE EMISSÃO DE POLUENTES E DE CONSUMO ENERGÉTICO. TESE DE DOUTORADO: PTR-EPUSP. SÃO PAULO, 2011.

LUCENA, Maria da Conceição Cavalcante. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E REOLÓGICA DE ASFALTOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS. 2005. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Química Inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/2080/1/2005_tes_Mar_Lucena.pdf. Acesso em: 04 maio 2023.

ALBANO, João Fortini. EVOLUÇÃO DAS VIAS: uma visão geral. Porto Alegre: Ufrgs, 2022. Color. Disponível em: http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/420_03-evolucao_das_vias.pdf. Acesso em: 10 abr. 2023.

GUIMARAES, Mylena Mendes *et al.* Engenharia de Pavimentação e suas Técnicas Construtivas. 24 f. Artigo. Disponível em: https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/19982/1/Artigo%20Definitivo_Engenhariadepavimentacao-Versao%20Final%20Corrigida.pdf. Acesso em: 23 abr. 2023.

ANDRADE, José Célio Silveira; COSTA, Paulo. Mudança climática, protocolo de Kyoto e mercado de créditos de carbono: desafios à governança ambiental global. Organizações & Sociedade, [S.L.], v. 15, n. 45, p. 29-45, jun. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1984-92302008000200002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/osoc/a/gD3Zk99h3txdzXZrRmZdcgL/?lang=pt>. Acesso em: 10 jun. 2023.

BARTHOLOMEU, D.B. Quantificação dos impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BRASIL, Ministério do Planejamento. Programa de Aceleração do Crescimento – Balanço 4 anos – 2007 – 2010, 2010.
_____, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, PNV. 2011.
_____, Mapa Rodoviário. Ministério dos Transportes. Disponível em <http://www.transportes.gov.br/index/conteudo/id/35852>.

IPEA. Rodovias Brasileiras: Gargalos, Investimentos, Concessões e Preocupações com o Futuro. Brasília (Série Eixos do Desenvolvimento Brasileiro – Comunicados do Ipea no 52), 2010.

SOARES, R.P.; NETO, C.A.S.C. Das Concessões Rodoviárias às Parcerias Público-Privadas: Preocupação com o Valor do Pedágio. Brasília, IPEA (Texto para Discussão no 1186), 2006.

PETROBRAS. Qual é o tamanho da sua pegada de carbono? Disponível em: https://nossaenergia.petrobras.com.br/sustentabilidade/qual-e-o-tamanho-da-sua-pegada-de-carbono-queremos-reduzir-a-nossa/?gclid=Cj0KCQjwmtGjBhDhARIsAEqfDEeiwXBwwPIOpINhPeIVe24KXyqrPesMrTDhPFIPYzP-FDOGesCNKOIaAptUEALw_wcB. Acesso em: 18 maio 2023.

VELOSO, Vinícius. Petrobras desenvolve mistura asfáltica com pegada de carbono até 65% menor. 2023. Disponível em: [https://www.aecweb.com.br/revista/noticias/petrobras-desenvolve-mistura-asfáltica-com-pegada-de-carbono-ate-65-menor/24281](https://www.aecweb.com.br/revista/noticias/petrobras-desenvolve-mistura-asfaltica-com-pegada-de-carbono-ate-65-menor/24281). Acesso em: 18 maio 2023.

BASTOS, Celso. Como as inovações na construção estão permitindo a transição para uma economia circular. 2022. Disponível em: <https://www.folhavoria.com.br/economia/blogs/economia-circular/2022/03/24/como-as-inovacoes-na-construcao-estao-permitindo-a-transicao-para-uma-economia-circular/>. Acesso em: 18 maio 2023.

INFRAROI. Novo asfalto morno da Petrobras promete ampliar descarbonização da pavimentação. 2023. Disponível em: <http://infraroi.com.br/2023/05/26/asfalto-morno-da-petrobras-promete-ampliar-descarbonizacao/>. Acesso em: 18 maio 2023.

Cap-and-trade scheme. Disponível em: <https://www.unescap.org/sites/default/files/5.%20FS-Cap-and-trade-scheme.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2023.

Reviewing Existing and Proposed Emissions Trading Systems, by Christina Hood (Paris, International Energy Agency, 2010). Available from www.iea.org/papers/2010/ets_paper2010.pdf

Climate Change 101: Understanding and Responding to Global Climate Change (Arlington, VA, Pew Center on Global Climate Change and The Pew Center on the States, 2009). Available from www.pewclimate.org/docUploads/Climate101-Complete-Jan09.pdf

INSTITUTE, Legal Information. Cap-and-trade. 2022. Disponível em: <https://www.law.cornell.edu/wex/cap-and-trade>. Acesso em: 11 jun. 2023.

PEGURIER, Eduardo. Taxando o carbono. 2007. Disponível em: <https://oeco.org.br/colunas/17181-oeco-20996/>. Acesso em: 11 jun. 2023.

FUND, Environmental Defense. How cap and trade works. Disponível em: <https://www.edf.org/climate/how-cap-and-trade-works>. Acesso em: 14 jun. 2023.

22, Página. Cap and trade no comércio europeu de carbono. 2010. Disponível em: <https://pagina22.com.br/2010/06/07/cap-and-trade-no-comercio-europeu-de-carbono/>. Acesso em: 14 jun. 2023.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DOS TRANSPORTES TERRESTRES, CCR. (2017). “ASFALTO BORRACHA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, AVALIAÇÃO REOLÓGICA DO LIGANTE ASFÁLTICO E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS”. Relatório Número: CCR-ND-AB- RF, 2017.

FHWA. (2017). “USER GUIDELINES FOR WASTE AND BYPRODUCT MATERIALS IN PAVEMENT CONSTRUCTION.” Relatório da Federal Highway Administration. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/st2.cfm>.

DNIT 111. “PAVIMENTAÇÃO FLEXÍVEL – CIMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO POR BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS PELO PROCESSO VIA ÚMIDA DO TIPO TERMINAL BLENDING – ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAL”. Rio de Janeiro, 2011.

PILATI, F. “ANÁLISE DOS EFEITOS DA BORRACHA MOÍDA DE PNEU E DO RESÍDUO DE ÓLEO DE XISTO SOBRE ALGUMAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS”. EESC-USP: Tese de Mestrado orientada pelo Prof Dr. Glauco Fabbri. São Carlos, 2008.

LA ROCHE, C; GAUDEFROY, ; VIRANAIKEN, V; PARANHOS, R. “A NEW EXPERIMENTAL TRIAL PROTOCOL FOR LABORATORY INVESTIGATIONS OF BITUMEN FUMES: INFLUENCE OF STIRRING AND STEAMED WATER ON EMISSIONS”. International Society for Asphalt Pavements. Zurich Anais, 2008.

PINHEIRO, J.H.M. “INCORPORAÇÃO DE BORRACHA DE PNEU EM MISTURAS ASFÁLTICAS DE DIFERENTES GRANULOMÉTRICAS”. Dissertação de Mestrado: Fortaleza, 2004.

ODA, S. "ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DO LIGANTE ASFALTO-BORRACHA EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO". EESC-USP: Tese de Doutorado, orientado pelo Prof Dr. José Leomar Fernandes Júnior. São Carlos, 2000.

Sousa, J. B.; Fonseca, P.; Freire, A.; Pais, J. "COMPARAÇÃO DA VIDA À FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE ENTRE MISTURAS COM BETUME MODIFICADO COM BORRACHA RECICLADA DE PNEUS CONVENCIONAIS." Relatório Consulpav EST 99-07. Portugal, 1999.

Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "asphalt". Encyclopedia Britannica, 2 Jul. 2023, <https://www.britannica.com/science/asphalt-material>.