

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E  
URBANISMO E GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS**

**ALLAN NUNES FERREIRA**

**A EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> E O GASTO ENERGÉTICO NA  
MANUTENÇÃO DE RODOVIAS: UM ESTUDO NA BR 262**

**Campo Grande, MS**

**2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E  
URBANISMO E GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS**

**ALLAN NUNES FERREIRA**

**A EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> E O GASTO ENERGÉTICO NA  
MANUTENÇÃO DE RODOVIAS: UM ESTUDO NA BR 262**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Meira de Vasconcelos

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Anijar de Matos

**Campo Grande, MS**

**2018**

**ALLAN NUNES FERREIRA**

**A EMISSÃO DE CO2 E O GASTO ENERGÉTICO NA MANUTENÇÃO DE  
RODOVIAS: UM ESTUDO NA BR 262**

Aprovado em: 23 / 11 / 2018

**Banca Examinadora:**

---

Profª Drª Eliane Guaraldo  
Coordenadora do PGRN

---

Professor Dr. Alexandre Meira de Vasconcelos  
Orientador - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

---

Professor Dr. José Marcato Junior  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

---

Professor Dr. Arthur Santos Silva  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

---

Dr. Ederson Zanetti  
Doutor em Ciências Florestais

**Campo Grande, MS**

**2018**

Este trabalho é dedicado à minha amada família,  
motivo de tudo o que eu faço.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha esposa Cristiane pela extrema paciência desprendida neste período.

Ao meu pequeno filho Matheus, que apesar de não entender direito o que está acontecendo foi sempre muito amoroso, mesmo quando teve respostas negativas aos seus pedidos.

Ao meu orientador, que sempre foi preciso em suas orientações e mesmo no momento difícil em que atravessa sempre achou meios para me dar suporte, foi sem dúvida uma honra fazer parte de sua história.

A instituição UFMS e todos os demais professores e colaboradores, sempre gentis e prestativos.

Aos meus familiares por acreditarem e me incentivarem a todo momento.

Aos meus colegas de DNIT.

A minha amiga Marly.

Ao Dr Eder pelas dicas preciosas.

E a todos os que direta ou indiretamente participaram deste trabalho.

*“Sou o que fiz daquilo que me fizeram”*

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a emissão de CO<sub>2</sub> e o gasto energético na manutenção de rodovias e o impacto ambiental proveniente destas ações. Da revisão de literatura, verificou-se que uma avaliação do ciclo de vida de cada projeto deve ser elaborada antes da tomada de qualquer decisão e a ferramenta PaLATE foi utilizada para esta avaliação, por se tratar especificamente de estudos de pavimentos em estradas. A partir disto, escolheu-se como estudo de caso um trecho da BR 262 e o impacto da utilização de Asfalto Misturado a Quente. Utilizou-se os métodos previstos pelo DNIT para dimensionar a manutenção considerando o crescimento de caminhões na via e as condições superficiais do pavimento. O projeto foi georreferenciado e definiu-se os pontos de extração dos materiais com suas distâncias médias de transportes com as ocorrências de materiais e as soluções a serem adotadas. Com as imagens de satélites também foi possível identificar áreas de reflorestamento e quantificá-las para mensurar a mitigação de CO<sub>2</sub> proposta. A ferramenta PaLATE proporcionou a realização de iterações de soluções com equivalência estrutural e a definição de qual o impacto ambiental de diferentes métodos no que tange a emissão de CO<sub>2</sub>. O estudo de caso em questão mostrou que para recuperação da rodovia conforme os métodos propostos são necessários 91,16há de floresta para sequestro de carbono e uma emissão de 37.803,05GWP e 700.879.762,92MJ de energia. Tais resultados apontam que uma avaliação do ciclo de vida dos materiais utilizados na mistura asfáltica e de seus métodos construtivos aliados a uma correta avaliação de emissão de poluentes pode resultar em melhorias ambientais significativas no setor de pavimentação. Concluiu-se que a avaliação do ciclo de vida possibilita a tomada correta de decisão visando a diminuição da emissão de gases poluentes e indica os principais fatores poluidores. O trabalho indicou também que a silvicultura é uma alternativa para o sequestro de carbono proveniente da manutenção rodoviária.

Palavras-chave: impacto ambiental, avaliação de ciclo de vida, manutenção rodoviária, mistura asfáltica a quente, gases de efeito estufa.

## ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the CO<sub>2</sub> emission and the energy expenditure in the maintenance of highways and the environmental impact resulting from these actions. From the literature review, it was verified that a life cycle assessment of each project should be elaborated before any decision was made and the PaLATE tool was used for this evaluation, since it is specifically about pavement studies on roads. From this, we chose as a case study a section of BR 262 and the impact of the use of Asphalt Mixed to Hot. The methods provided by the DNIT were used to dimension the maintenance considering the addition of trucks in the road and the surface conditions of the pavement. The project was georeferenced and the points of extraction of the materials with their average distances of transport were defined with the occurrences of materials and the solutions to be adopted. With the satellite images it was also possible to identify reforestation areas and quantify them to measure the proposed CO<sub>2</sub> mitigation. The PaLATE tool provided the realization of iterations of solutions with structural equivalence and the definition of the environmental impact of different methods with regard to the emission of CO<sub>2</sub>. The case study in question showed that 91.16 ha of forest for carbon sequestration and an emission of 37,803.05 GWP and 700,879,762.92MJ of energy are needed to recover the highway according to the proposed method. The results indicate that a life cycle assessment of the materials used in the asphalt mix and its construction methods together with a correct evaluation of the emission of pollutants can result in significant environmental improvements in the pavement sector. It was concluded that the life cycle assessment allows for the correct decision making aiming at reducing the emission of pollutant gases and indicates the main polluting factors and also that forestry is an alternative to carbon sequestration road maintenance.

Keywords: environmental impact, life cycle assessment, road maintenance, hot asphalt mixture, greenhouse gases.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Objetivos Específicos do Trabalho.....	13
Tabela 2 - Relação de Artigos Pós Seleção (Continua).....	18
Tabela 3 Emissão de GEE na prod. de CBUQ.....	31
Tabela 4 - Emissão de Carbono nas Etapas Chave.....	33
Tabela 5 - Emissão de Carbono por estágio. Continua.....	33
Tabela 6 - Redução das emissões nos estágios chave. ....	33
Tabela 7 - Economia energética e redução de emissões.....	34
Tabela 8 - Método AASHTO para Fc. ....	44
Tabela 9 - Método USACE para Fc.....	44
Tabela 10 - Número N.....	45
Tabela 11 – Espessura da camada asfáltica em relação ao número "N".....	45
Tabela 12- Conceito de Degradação do Pavimento.....	46
Tabela 13 - Fator de ponderação. Continua.....	47
Tabela 14 - Traço de Mistura Asfáltica.....	48
Tabela 15 - Propriedades do Diesel.....	49
Tabela 16 - Fator de Emissão de CO <sub>2</sub> do Gás Natural.....	49
Tabela 17 - Relação dos Segmentos Estudados. ....	54
Tabela 18 - Definições das Camadas em unidades métricas. ....	54
Tabela 19 - Resultado da primeira simulação.....	56
Tabela 20 - Resultado da segunda simulação.....	57
Tabela 21 - Emissão de CO <sub>2</sub> por combustível.....	57
Tabela 22 - Resultados da terceira simulação.....	58
Tabela 23 - Resultados da quarta simulação.....	59
Tabela 24 - Resultado das Simulações na Etapa de Produção dos Materiais .	61
Tabela 25 - Quantificação total de Consumo Energético e Emissão de CO <sub>2</sub> ..	61
Tabela 26 - Gasto Energético e Emissão de CO <sub>2</sub> da Produção da Mistura Asfáltica.....	62
Tabela 27 - Gasto Energético e Emissão de CO <sub>2</sub> na produção da Base.....	62
Tabela 28 - Simulação WMA.....	63
Tabela 29 - Comparação entre WMA a Gás e CBUQ a óleo.....	64
Tabela 30 - Desenvolvimento da floresta.....	66
Tabela 31 - Compensação de CO <sub>2</sub> x Floresta.....	67

Tabela 32 - Quantificação total de Área Plantada.....	67
---	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pesquisa do referencial teórico.....	17
Figura 2 - Publicações por ano.....	25
Figura 3 - Mapa Mental dos Artigos Estudados.....	26
Figura 4 - Comparativo entre os tipos de aquecimento.....	36
Figura 5 - Localização do trecho em análise.....	41
Figura 6 - Perfil Deflectométrico do Segmento.....	46
Figura 7 - Localização e Área da Floresta Estudada.....	52
Figura 8 - Seção Tipo 1, Recuperação do pavimento.....	55
Figura 9 - Seção do Pavimento Existente.....	55
Figura 10 - Seção Tipo Perímetro Urbano.....	55
Figura 11 - Emissão de CO <sub>2</sub> para primeira simulação.....	56
Figura 12 - Consumo de energia na primeira simulação.....	56
Figura 13 - Emissão de CO <sub>2</sub> para segunda simulação.....	57
Figura 14 - Gráfico de Energia Consumida para segunda simulação.....	58
Figura 15 - Emissão de CO <sub>2</sub> na terceira simulação.....	59
Figura 16 - Consumo energético na terceira simulação.....	59
Figura 17 - Emissão de CO <sub>2</sub> na quarta simulação.....	60
Figura 18 - Consumo energético na quarta simulação.....	60
Figura 19 - Resultado das Simulações na Etapa de Produção dos Materiais.....	61
Figura 20 - Consumo energético do WMA.....	63
Figura 21 - Emissão de CO <sub>2</sub> na WMA.....	64
Figura 22 - Uso de Energia nos processos construtivos.....	65

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	11
1.1	Objetivos .....	12
1.2	Justificativa.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	Revisão Bibliográfica Sistemática .....	16
2.2	Leitura e Análise do Referencial Teórico.....	18
2.3	Um Modelo De Economia Circular .....	21
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	24
3.1	Planejamento Da Pesquisa .....	24
3.2	Sistema Normativo .....	38
4	MÉTODO .....	40
4.1	Geotecnologias .....	40
4.2	Estudo De Tráfego .....	41
4.3	Análise Do Pavimento .....	45
4.4	Mitigação Ambiental.....	50
5	RESULTADOS.....	54
5.1	Quantificação Da Emissão De CO <sub>2</sub> .....	54
5.2	Sequestro Do Co <sub>2</sub> Emitido Pela Produção Da Mistura Asfáltica .....	66
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	68
	REFERÊNCIAS.....	70
	ANEXO A – Calculo do número N.....	11

## 1 INTRODUÇÃO

O setor de transportes é uma das mais importantes forças motrizes do crescimento da economia mundial; como parte crucial deste sistema, a rede rodoviária fornece mobilidade para a sociedade e é vital para a economia. Ao mesmo tempo, contribui significativamente para a pegada ambiental, que é o impacto causado na natureza durante a sua construção, operação e manutenção (LOUHGHALAM *et al.*, 2017).

A relação entre os pavimentos e o meio ambiente é pouco abordada na literatura. Existem pesquisas que começam a compreender esta relação, mas não conseguem caracterizar o impacto de forma abrangente (AURANGZEB *et al.*, 2014). Utilizando a Avaliação do Ciclo de Vida, o impacto dos pavimentos pode ser quantificado, a fim de descobrir formas de minimizar o impacto ambiental deste vasto sistema de infraestrutura civil. O termo ciclo de vida refere-se às atividades principais em toda a cadeia produtiva do pavimento, desde a aquisição de materiais, construção, uso e manutenção até sua disposição final (SANTERO *et al.*, 2013). Tal técnica é utilizada para avaliar o potencial impacto ambiental associado às várias fases de vida do pavimento, porém o “ciclo de vida do pavimento” deve definir qual o objetivo e escopo a ser estudado (AURANGZEB *et al.*, 2014).

A gestão do ciclo de vida do pavimento é fundamental para o controle de carbono, sendo que entre todas as fontes de emissão de poluentes no mundo a de carbono do transporte corresponde a cerca de 15% do total emitido sendo que a magnitude da emissão de carbono do transporte entre 1995 e 2005 foi de 16%, que é três vezes a emissão das indústrias. Com esta tendência, o transporte será a segunda fonte de emissões de carbono até 2025 (ZHAO *et al.*, 2016). A avaliação do ciclo de vida e avaliação do impacto ambiental dos pavimentos rodoviários, incluindo os co-produtos ou a reciclagem de fim de vida, embora ainda em desenvolvimento, ajudam na transparência da tomada de decisões, no entanto o impacto do método escolhido sobre os resultados ainda não foi totalmente explorado (HUANG *et al.*, 2013).

O Brasil possui cerca de 50 mil quilômetros de estradas federais asfaltadas (DNIT, 2018), sendo que sua totalidade está contemplada com programas de manutenção. Estes programas consideram algumas premissas na sua quantificação como elaboração do inventário do trecho em análise, definição clara das tarefas a serem

realizadas e suas unidades de medição, estimativa das quantidades de trabalho a serem executadas anualmente, otimização do emprego de mão de obra e equipes padrão para cada quantidade de trabalho e aferição do tráfego.

O asfalto tradicional de mistura quente é usado na construção e manutenção de pavimentos, que emite grandes quantidades de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. Ampliar e aprimorar a modelagem são passos críticos que a pesquisa requer para dar suporte à criação de pavimentos que causem menores impactos na natureza (AURANGZEB *et al.*, 2014).

O presente trabalho contempla uma área multidisciplinar de conhecimento, pois envolve temas relacionados a engenharia de infraestrutura, engenharia ambiental e georreferenciamento, pois o mesmo propõe avaliar a estrutura do pavimento em estudo, calcular soluções de manutenção, avaliar o impacto destas soluções e mapeá-lo durante a análise.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o impacto ambiental gerado pela manutenção e pelo consumo de Asfalto Misturado a Quente na rodovia BR 262 no segmento entre o Município de Três Lagoas e Ribas do Rio Pardo em Mato Grosso do Sul, nos programas de manutenção da rodovia e explorar um método de análise desse impacto visando a mitigação dos impactos ambientais. Para tal, foi analisado um segmento menor da rodovia baseado no tráfego estudado no local.

Para alcançar este objetivo mais amplo, tem-se como meta cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Revisar a literatura a respeito do impacto ambiental proveniente das manutenções rodoviárias;
- Analisar o projeto de manutenção da rodovia considerando o aumento de tráfego de caminhões conforme as normativas vigentes;
- Georreferenciar o trecho em estudo, delimitando sua área de influência (extração de materiais virgens);

- Definir qual o impacto ambiental causado pelo consumo de CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente) na manutenção da via, quantificando as emissões de CO<sub>2</sub> oriundos da secagem, extração e aquecimento do agregado e aquecimento da mistura asfalto/agregado;
- Propor alternativas ao método tradicional de aquecimento por alternativas ambientalmente amigáveis e valorar estes benefícios;
- Propor meios de mitigar os impactos ambientais quantificados.

Os objetivos específicos do trabalho estão descritos na Tabela 1 de modo a facilitar a compreensão e organização dos dados.

Tabela 1 - Objetivos Específicos do Trabalho.

Objetivo Específico	Procedimento Metodológico	Fonte De Dados
Revisão da literatura a respeito do impacto ambiental causado pela manutenção rodoviária	Busca em artigos publicados nas bases indexadas	SCOPUS, Web Of Science, Science Direct
Definir o projeto de manutenção da rodovia considerando o aumento de tráfego de caminhões conforme as normativas vigentes.	Utilizar os métodos previstos pelo DNIT para redimensionar o projeto a partir do crescimento de caminhões na via	DNIT
Georreferenciar o trecho em estudo, delimitando sua área de influência (extração de materiais virgens)	A partir das imagens de satélite definir qual a área influenciada pela obra e qual a área de floresta necessária para mitigar a emissão de CO <sub>2</sub> na natureza	DNIT GEO, Google Earth PRO, Google Engine, por meio da análise das imagens dos satélites
Definir qual o impacto ambiental causado pelo consumo de CBUQ na manutenção da via.	Definir o meio de análise do impacto ambiental pela Avaliação do Ciclo de Vida	Utilizar o método ACV de julgamento para análise baseado no encontrado na pesquisa bibliográfica realizada, coletar dados de emissão de gases de efeito estufa e quantificá-los.

Fonte: Autor.

## 1.2 Justificativa

Conforme Haas *et al* (1994), os gestores responsáveis pela malha rodoviária federal devem tomar decisões corretas no tempo exato, pois tanto na conservação de rodovias quanto no gerenciamento de vias, o objetivo é utilizar informações confiáveis e critérios de decisão corretos para produzir um programa de conservação que dê o máximo retorno possível para os recursos disponíveis durante o ciclo de vida do pavimento. Por isso o projeto de manutenção e recuperação da rodovia deve ser analisado e seu impacto ambiental quantificado para que seja dimensionado sua mitigação da maneira mais amigável ambientalmente.

A proposta de trabalho enquadra-se na área de Ciências Ambientais multidisciplinar, pois necessita considerar a interação entre sistemas construtivos de baixo e alto impacto ambiental cujas técnicas atualmente empregadas visam, na maioria das vezes, a economia e não os fatores socioambientais, devido a isso, torna-se cada vez mais importante o estudo a respeito de práticas ambientalmente amigáveis que consideram não apenas um, mas diversos fatores dentro de um sistema integrado ambientalmente. Tem importância acadêmica, social e ambiental, pois considera meios antrópicos e ambientais, buscando alternativas construtivas e meios mitigadores sustentáveis.

Está sendo elaborado pelo DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, um EVTEA – Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental para o contorno viário do município de Três Lagoas, cuja justificativa foi extraída do Edital 0467/14-16 e aplica-se também a BR-262:

ELDORADO CELULOSE PAPEL S/A., em implantação com início de operação prevista para 2013; FIBRIA CELULOSE SUL-MATOGROSSENSE LTDA., em operação prestes a expandir sua produção, consideradas a primeira e segunda, respectivamente, maiores empresas do ramo no mundo, a PETROBRÁS S.A. - Unidade de Fertilizantes Nitrogenados UFN-3), anunciada como a maior do ramo na América Latina, em implantação anunciado início de suas operações para 2014; SITREL Siderúrgica Três Lagoas também em implantação, além de outras indústrias de menor porte agregadas às respectivas atividades, como logística e industrialização dos subprodutos destes empreendimentos. Todas situadas num raio máximo de 30 km deste centro Urbano, com seus acessos às Rodovias Federais, BR-158/MS e BR-262/MS, onde inevitavelmente terão como vias de acessos a travessia urbana, seja no escoamento de sua produção, seja na obtenção da matéria prima e grande parte do escoamento do produto industrializado, dissemos parte porque há uma tendência do uso multimodal de transportes, existindo a ferrovia e a hidrovia do rio Paraná. Estas duas rodovias federais, além da solicitação acima descrita, têm como solicitação principal o tráfego de veículos pesados provenientes de longa distância, cortam todo o Estado.

BR-262/MS - se destaca pela sua posição geográfica no estado, encurtando as distâncias entre a região sudeste do País e o pantanal sul mato-grossense, desde Corumbá, passando pela Capital do Estado ligando esta ao Município de Três Lagoas e ao Estado de São Paulo. É uma rodovia de utilização mista sob o ponto de vista classificatório do tráfego, sem predominância destacada do tipo de tráfego, se por um lado hoje vem crescendo muito o escoamento de produção agrícola e pecuária rumo ao centro sul, por outro, é porta de entrada dos produtos industrializados que adentram o estado, bem como o caminho mais curto para o turismo pantaneiro.

O objetivo do trabalho é determinar os ganhos ambientais de diferentes técnicas produtivas com o uso da ferramenta *Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects* (Ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida do Pavimento para Efeitos Ambientais e Econômicos) - PaLATE, embasando a redução do uso de material virgem, a diminuição da emissão de gases poluentes e a poupança de energia, pois cerca de 40% da extração de material no mundo é utilizado para construção (BLANKENDAAL; SCHUUR; VOORDUK, 2014).

Este trabalho, além de analisar o ciclo de vida de um projeto proposto comparando soluções técnicas equivalentes encontradas na bibliográfica, quantificou os impactos ambientais e propôs meio de mitigação a esses impactos considerando as variáveis de uma obra de recuperação de pavimento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Revisão Bibliográfica Sistemática

As palavras-chave selecionadas na pesquisa estão relacionadas à gestão ambiental ou sustentabilidade conjugadas com a construção e uso de rodovias. A busca ocorreu em março de 2017, e considerou-se apenas os últimos 10 anos, ou seja, foram pesquisados artigos publicados entre 2007 e 2017 nas bases *SCOPUS*, *Web Of Science* e *Science Direct*.

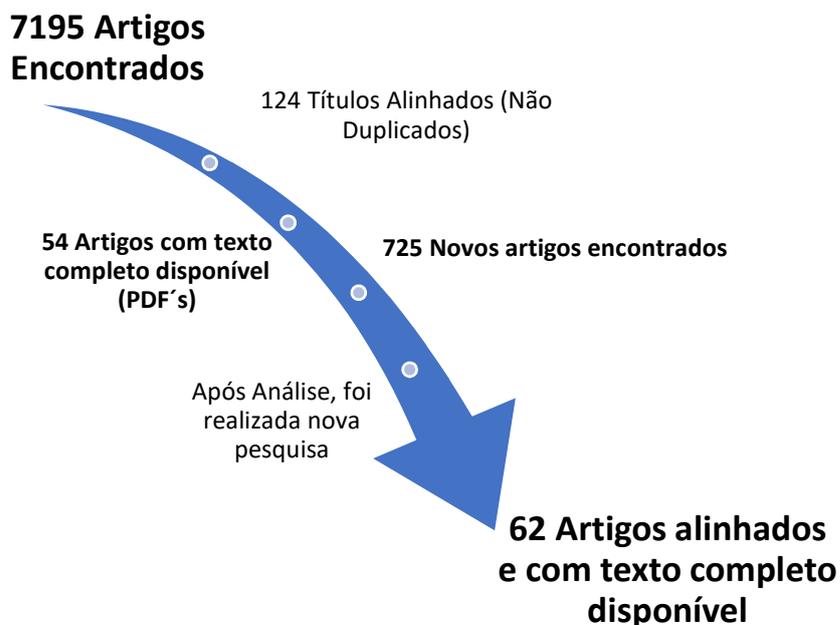
Prosseguiu-se com as análises dos artigos encontrados, categorizados por ano, a fim de facilitar o trabalho de seleção. Após isso, foram analisados todos os títulos dos trabalhos encontrados nas referidas bases de dados, e então selecionados apenas os que estavam alinhados as palavras-chave da pesquisa e também ao tema do estudo. Nesta seleção, priorizaram-se artigos científicos e de revisão bibliográfica e foram desconsiderados livros, artigos no prelo (não publicados na íntegra), editoriais, notas e literatura cinzenta em geral. Esta escolha prioriza artigos, porque estes são evidências mais atualizadas do progresso científico e se originam de um processo reconhecido no mundo acadêmico, avaliado por pares, documentado, registrado e formal (VASCONCELOS *et al.*, 2012).

A partir da leitura dos títulos e resumos dos 7.195 artigos, 124 artigos foram considerados relevantes para o estudo. Após a leitura completa dos 124 artigos, verificou-se que 56 artigos de fato estão consoantes com o tema de estudo. Posteriormente, utilizando-se os mesmos critérios, realizou-se nova busca de publicações para complementar o entendimento dos textos, resultando em outros 17 artigos não duplicados relevantes, porém apenas 15 de fato contribuiriam para a pesquisa. Por fim, 71 artigos completos, alinhados ao tema proposto, com os textos em formato PDF disponível, foram encontrados e considerados nesta revisão bibliográfica.

Com a leitura do material selecionado, realizou-se uma nova pesquisa, cujas palavras-chave foram relacionadas à pegada de carbono, gestão ambiental e sustentabilidade, combinadas com mistura de asfalto a quente. Tal pesquisa, seguindo os mesmos critérios descritos anteriormente, originaram 725 artigos na

base de dados SCOPUS, que após filtragem e seleção de textos completos resultaram 114 artigos passíveis de serem utilizados nesta dissertação. Com a leitura dos títulos, resumos e introduções, foram selecionados 62 dentro todos os artigos concernentes ao tema conforme a Figura 1.

Figura 1 - Pesquisa do referencial teórico.



Fonte: Autor.

Considerando a disponibilidade de recursos e de tempo, foram priorizados os artigos cujos conteúdos são gratuitos, bem como aqueles com data de publicação mais recente, mantendo assim a consonância com a temática em estudo.

Os artigos foram avaliados por uma escala likert de 3 pontos mediante os seguintes critérios:

- Aderência do conteúdo aos objetivos da pesquisa – se os artigos selecionados de fato são alinhados com a temática do impacto ambiental;
- Contribuição teórico-empírica dos mesmos para a pesquisa – este critério define se os resultados da pesquisa em estudo foram relevantes ao tema;
- Aporte teórico - este critério considera se o aporte teórico de fato representa o interesse da pesquisa.

## 2.2 Leitura e Análise do Referencial Teórico

A leitura dos artigos comprovou que a classificação dos mesmos de fato impactou na seleção do portfólio, mas não inibiu o autor de ler outros periódicos para compor o trabalho. Os artigos do portfólio contribuíram para esta dissertação, pois direcionaram os estudos aos pontos relevantes do processo, indicando os processos mais ambientalmente agressivos, mesmo assim outros artigos foram pesquisados para compor este estudo. Dos 62 artigos classificados, os que tiverem a maior somatória considerando os critérios propostos estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 - Relação de Artigos Pós Seleção (Continua).

Autores	Contribuições	Conclusões	Soma Total
(Peng <i>et al.</i> , 2015)	Quantifica a emissão de poluentes por etapas na manufatura da mistura asfáltica por meio de hierarquia analítica, definindo as etapas mais poluidoras e propõe métodos para minimizar esses impactos.	O aquecimento do agregado e da mistura asfáltica é a etapa com maior potencial poluente e de maior gasto energético, devendo estas etapas serem analisadas e comparadas a outros métodos construtivos.	9
(Azarijafari, Yahia ; Ben Amor, 2016)	Análise do Ciclo de Vida do pavimento - Quantifica, analisa e compara os principais poluentes no processo. Expõe as incertezas no processo e os cuidados a serem adotados na ACV, devido as grandes quantidades de materiais utilizados de fontes distintas e variáveis dentro do processo, dificultando o processo de quantificação de emissão de poluentes, como por exemplo a influência do tráfego, tais inconsistências tornam a ACV difíceis de serem comparadas. A falta de um inventário preciso também dificulta a análise do ciclo de vida do pavimento.	Com a obrigatoriedade de que pelo menos 70% dos resíduos da construção devem ser reutilizados na Europa até 2020, as lacunas nos processos construtivos deverão ser mais exploradas de modo mitigar os impactos ambientais nas rodovias onde a ACV será necessária para minimizar as perdas econômicas e prejuízos ambientais.	9
Chan <i>et al.</i> , 2011)	Indica os principais critérios para pavimentos ambientalmente amigáveis e métodos para prolongar sua vida útil. Define a sustentabilidade do pavimento pela energia consumida e emissão de poluentes emitidos. Cita que intervenções no momento correto, quando o pavimento ainda está em relativo bom estado é mais viável econômica/ambientalmente do que uma restauração mais traumática no pavimento.	Preservar o pavimento satisfaz a definição de sustentabilidade, pois quando executado de maneira correta no tempo preciso utiliza pouco recurso material e a baixo custo operacional, a prevenção de patologias é mais rápida, barata, menos traumática aos usuários a rodovia e economicamente viável. A implementação de princípios de gerência de pavimentos sustentáveis e medidas de desempenho são fundamentais para atender aos requisitos de investimento em infraestrutura e obrigações ambientais a longo prazo.	9

Tabela 2 - Relação de Artigos Pós Seleção (Continuação).

<p>(Hanson, Noland ; Cavale, 2012)</p>	<p>Relação da emissão de gases de efeito estufa com a temperatura de aquecimentos dos métodos utilizados para produção de WMA/HMA. Fornece tabelas demonstrativas com os níveis de emissões de diferentes métodos construtivos.</p>	<p>A análise de quatro tipos de pavimentos mostrou que o método WMA é o que menos emite poluentes atmosféricos relacionados ao efeito estufa com a apresentação de tabela demonstrando os índices de cada método estudado.</p>	<p>9</p>
<p>(Liu, Shukla ; Nandra, 2009)</p>	<p>Cita que a maior temperatura de aquecimento/mistura do HMA está relacionada a um maior grau de emissão de poluentes baseado em uma análise de vários artigos estudados demonstrados em tabelas e gráficos. Utiliza RAP para diminuir os impactos ambientais e demonstra quais as maneiras mais eficientes na dosagem da mistura.</p>	<p>A utilização de RAP nas misturas asfálticas reduz os impactos ambientais, mas a temperatura de aquecimento/mistura deve ser definida de modo a não comprometer as propriedades físico/químicas do produto bem como relação da dosagem de RAP na mistura da massa asfáltica.</p>	<p>9</p>
<p>(Park ; Ahn, 2015)</p>	<p>Analisa o impacto ambiental da construção/manutenção rodoviária e demonstra quais benefícios econômicos das decisões ambientalmente amigáveis.</p>	<p>Mostra a relevância de um sistema hierárquico para se atingir os objetivos ambientais em um sistema de rodovias. O sistema de avaliação proposto para este estudo pode orientar e garantir práticas ecológicas em todas as fases do ciclo de vida de uma estrada, abrangendo seu projeto, construção, operação e manutenção e eventualmente demolição dentro de um contexto sul-coreano. Tem como objetivo classificar os projetos e vias e motivar gestores a construir e operar rodovias mais sustentáveis.</p>	<p>9</p>
<p>(Schlegel <i>et al.</i>, 2016)</p>	<p>Analisa o ciclo de vida da construção com ênfase no processo de secagem/aquecimento do material asfáltico com experimentos de adições de cal hidratada de modo a alterar as características do HMA.</p>	<p>Conclui que a adição de cal hidratada a mistura asfáltica a quente reduz os esforços de manutenção rodoviária por melhorar as características do produto, e de modo a aumentar sua vida útil, consequentemente, reduz a pegada ambiental do processo, sendo esta uma alternativa rápida e de aplicação imediata para minimizar os impactos ambientais neste processo.</p>	<p>9</p>
<p>(Taher ; Aman, 2016)</p>	<p>Cita os benefícios da mistura morna (WMA) e utilização de RAP na mistura e sua relevância no cenário internacional.</p>	<p>Descreve experiências práticas da utilização do WMA e seus desempenhos mecânicos incluindo os projetos, materiais utilizados e eventuais problemas mecanísticos. O artigo discute tanto a questão ambiental quanto a questão do desempenho da mistura morna.</p>	<p>9</p>

Tabela 2 - Relação de Artigos Pós Seleção (Continuação).

(Anthonissen, Braet ; Van Den Bergh, 2015)	Quantifica a energia necessária para produzir, armazenar e estocar o material asfáltico fazendo comparações de desempenhos entre o HMA, WMA E CMA e analisa suas alternativas técnicas e ambientais.	O artigo comparou o desempenho de quatro seções de pavimentos analisando os resultados de cada técnica utilizada. Questiona os benefícios da redução da temperatura em detrimento aos materiais utilizados, que causam danos ambientais pelo uso de materiais zeólitos artificiais.	8
(Cass ; Mukherjee, 2011)	Propõe uma sistemática para ACV de modo a poupar energia e reduzir a emissão dos poluentes.	O estudo analisa dados específicos da via com riqueza de detalhes suficientes para uma análise consistente da ACV utilizando os dados da construção e dos envolvidos na obra para coletar as informações, gerando uma ACV simples e de fácil procedimento.	8
(Giani <i>et al.</i> , 2015)	Cita a relevância de se utilizar métodos e materiais ambientalmente amigáveis que geram benefícios tanto econômicos quanto sociais e visam preservar a vida útil do pavimento utilizando-se o RAP como alternativa de manutenção/restauração rodoviária.	Considerando todas as fases da produção do asfalto concluiu-se que a extração e produção de material virgem representa 40% das emissões de GEE, onde a utilização de RAP e o método de asfalto morno (WMA) tem um potencial ambiental elevado sendo a chave para a produção sustentável. A técnica de reciclagem a frio sem adição de materiais virgens e sem transportes de novos materiais também se mostrou eficaz na redução de emissão de poluentes, mas utiliza derivado de petróleo, o que ambientalmente compromete a técnica.	8
(Jamshidi <i>et al.</i> , 2012)	Demonstra que a maior temperatura de aquecimento/mistura do HMA está relacionada a um maior grau de emissão de poluentes.	Demonstra os benefícios da técnica WMA e agregados de baixo carbono, mostrando em tabelas e gráficos os benefícios destas técnicas e suas contribuições para a sociedade chinesa.	8
(Keijzer <i>et al.</i> , 2015)	Relata estudos em países europeus em que o asfalto de baixa energia emite até 30% menos poluentes.	Compara os artigos publicados a análises de diferentes classes de rodovias estudadas e relata que as particularidades de cada região devem ser analisadas com critérios para que informações importantes não sejam sonegadas e os resultados não sejam baseados apenas em referências bibliográficas.	8
(Santos, Flintsch ; Ferreira, 2017)	Mostra que a ACV é uma ferramenta importante para identificar potenciais fontes poluidoras no processo e indica meios de mitigação dos impactos ambientais.	Mostra que para a região estudada a reciclagem a quente com adição de 30% de RAP se mostrou mais sustentável e que atendem as demandas governamentais com um menor custo. Propõe um método de análise que pode ser usado por gestores de modo a quantificar os benefícios das técnicas utilizadas.	8

Tabela 2 - Relação de Artigos Pós Seleção (Conclusão).

(Dinis-Almeida ; Afonso, 2015)	Cita benefícios da utilização da técnica de WMA e da reciclagem com adição de RAP	Mostrou que o desempenho das misturas mornas é equivalente as misturas a quente, com algumas perdas de desempenho que podem ser corrigidas com adições de outras substâncias, mantendo os ganhos mecanísticos e ambientais.	7
(Gschösser, Wallbaum ; Boesch, 2012b)	Cita que a ACV não deve ser genérica e sim estudada casa a caso para um resultado confiável	Mudanças na escolha dos materiais e métodos construtivos representam significativos ganhos ecológicos dentro do processo com até 59% menos emissão de poluentes e maior ganho ambiental também na manutenção rodoviária	7
(Zhao <i>et al.</i> , 2016)	A gestão do ciclo de vida dos materiais se mostra fundamental para análise de impactos ambientais da rodovia como um todo	A gestão ambiental da rodovia deve considerar meios de minimizar os poluentes dos veículos, mantendo a mesma em condições de trafegabilidade adequada pois assim as emissões provenientes da manutenção excessiva e dos veículos será minimizada no processo.	6

Fonte: Autor.

### 2.3 Um Modelo De Economia Circular

Conforme Allwood *et al.* (2011), os impactos ambientais relacionados à energia de produção dos materiais empregados pela engenharia na infraestrutura e construção estão se tornando críticos rapidamente, apesar de estarem melhorando ao longo dos anos. A eficiência nos processos visa reduzir esta energia, mas espera-se que a demanda por materiais dobre nos próximos 40 anos e nos países industrializados, essas estratégias tiveram pouca atenção, devido a barreiras econômicas, regulatórias e sociais. No entanto, a busca pela eficiência energética sugere que essas barreiras podem ser superadas.

A indústria de pavimentos vem adotando práticas sustentáveis para alinhar-se com a noção global de ambientalmente amigáveis e tem havido um uso crescente da avaliação do ciclo de vida. O impacto ambiental analisado com a utilização de RAP (Reclaimed asphalt pavement – Pavimento de asfalto reciclado) para camadas de asfalto mostrou uma significativa redução na emissão de gases de efeito estufa e no consumo de energia no ciclo de vida, mesmo que na fase de construção a contribuição de gases de efeito estufa e uso de energia se mostraram mínimas (AURANGZEB *et al.*, 2014).

Ainda, a avaliação do ciclo de vida é uma metodologia para avaliar a carga ambiental de processos e produtos (bens e serviços) durante seu ciclo de vida (BLANKENDAAL; SCHUUR; VOORDUK, 2014). Um modelo de produção baseado na utilização de materiais e recursos, consumo e descarte está muito presente nesta área da engenharia de infraestrutura. Observa-se que apesar das inúmeras pesquisas a respeito do reuso dos materiais oriundos da recuperação das rodovias, ainda existe resistência por vários setores por utilizar estes materiais que antes seriam descartados visto que alguns países europeus já reutilizam os materiais antes descartados, chegando de 95% a 100% de reaproveitamento (TAHER; AMAN, 2016).

A economia circular tem como objetivo um circuito fechado de materiais, eliminando idealmente todos os recursos de entrada e saída do sistema, objetivando com isso o benefício ambiental e econômico dos envolvidos (GEISSDOERFER *et al.*, 2017). Na pavimentação, para camadas finais do pavimento, adiciona-se materiais a fim de melhorar ou corrigir as características do material a ser reutilizado (DNIT, 2013). Com isso, a reciclagem passa a ter uma função mais sustentável para este tipo de obra.

A avaliação ambiental da estrutura da via é tão importante quanto a técnica e os critérios de construção (MORETTI; DI MASCIO; D'ANDREA, 2013), não apenas os critérios econômicos devem ser considerados, mas também os ambientais na determinação dos parâmetros do projeto de uma rodovia.

Atingir um sistema de transporte sustentável depende da capacidade de integrar múltiplas estratégias efetivas, por exemplo, planejamento integrado de desenvolvimento de transportes, melhoria dos serviços de transporte público e infraestruturas de transporte verdes - ou não motorizadas, implementação de tecnologias avançadas na gestão e demanda de sistemas de transporte, gestão, políticas de proteção ambiental, etc. Para que se atinja o desenvolvimento sustentável no transporte, é fundamental abordar como os planejadores devem projetar um sistema de transporte que não apenas aumente a mobilidade e o crescimento econômico, mas também minimize a degradação ambiental e a mudança climática para as gerações atuais e futuras (XU; CHEN; YANG *et al.*, 2016).

Materiais de infraestrutura de engenharia civil podem contribuir significativamente para o movimento de sustentabilidade através do uso de materiais reciclados e processos de produção mais ecológicos. A reciclagem foi definida como um método pelo qual o pavimento de asfalto reciclado (RAP) é combinado com novo agregado e betume ou agente de reciclagem para produzir asfalto misto que é obtido por moagem do pavimento com tambor rotativo a frio ou a partir de uma operação de extração ou trituração (TAHER; AMAN, 2016). Esses mesmos autores recomendam que se deveria obrigar os construtores de rodovias a usar a RAP na concessão de contratos para ajudar a reduzir a abundância de material de asfalto reutilizável estocado em campos vazios ou em estradas e, posteriormente, diminuir os custos de construção de novas rodovias e estradas.

Aumentar a proporção de materiais reciclados pode resultar em uma mitigação de 27% dos gases de efeito estufa, enquanto que a eficiência dos equipamentos melhora apenas 12% essa redução (LIU; CUI; SCHWARTZ, 2014). Ainda, o uso de uma base estabilizada com espuma (FSB sigla em inglês) elimina a necessidade de extrair pedreiras e transportar agregados virgens e reduz o teor de asfalto em 60% em comparação com o mistura asfáltica a quente, ou CBUQ – concreto betuminosos usinado a quente (HMA, sigla em inglês) e dada a natureza única do processo de construção e as condições do local em cada projeto, conclusões gerais derivadas de observações históricas podem não ser aplicáveis para novos projetos de pavimento na fase de planejamento. Mesmo em pavimentos de projetos semelhantes por exemplo, na reconstrução com CBUQ a faixa estimada de GEE varia de 92 T a 291 T por pista-quilômetro (km).

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Os artigos avaliados serviram de base para os procedimentos adotados no trabalho, indicando os temas mais relevantes a serem abordados e onde os reais impactos são mais evidentes. Com isso planejou-se a pesquisa visando a quantificação destes impactos por meio de uma avaliação do ciclo de vida dos processos construtivos. Nesta dissertação serão considerados os diferentes impactos causados pelo aumento de tráfego no projeto de manutenção BR 262, região de Três Lagoas ao KM 190, pois no referido local as indústrias de celulose utilizam as rodovias federais para escoar sua produção. Com o iminente aumento da produção de celulose na região, a rodovia sofrerá aumento de tráfego, impactado pelo aumento dos caminhões que transitarão no trecho em análise. Devido a isso, uma maior quantidade de CBUQ será utilizada por ano, gerando impacto ambiental, sendo este o objeto da pesquisa.

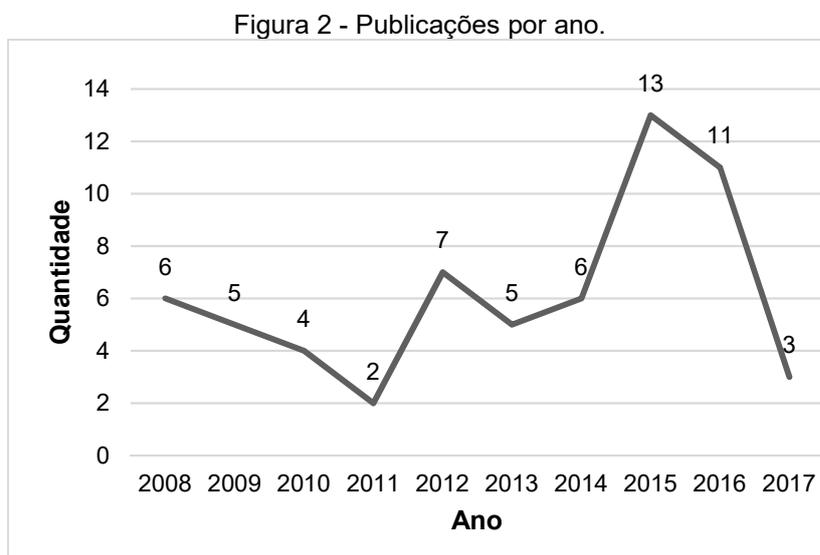
Para a quantificação das emissões de poluentes, foram simulados cenários baseados nos dados levantados em campo e embasados pela revisão bibliográfica de soluções técnicas para produção do CBUQ. O trabalho propõe quatro simulações para quantificação de poluentes considerando o CBUQ aquecido com óleo tradicional, CBUQ aquecido com gás natural, CBUQ com utilização de material reaproveitado da pista aquecido com óleo tradicional e também com gás natural.

De posse dos dados obtidos na rodovia em análise, elaborou-se um plano para sua recuperação e manutenção, visando atender um período de tempo de 10 anos em que as condições de superfície da via sejam consideradas aceitáveis para a segurança dos usuários e viável como investimento público. A avaliação ambiental deste programa de manutenção foi determinada por meio da análise do ciclo de vida das técnicas propostas.

#### **3.1 Planejamento Da Pesquisa**

O MAP-21 é a primeira autorização de rodovia a longo prazo promulgada desde 2005 e vai financiar os programas de transporte de superfície ao longo de todo o mundo com mais de US \$ 105 bilhões de incentivos para os anos fiscais 2013 e 2014. O MAP-21 estabeleceu a sustentabilidade ambiental como uma das metas

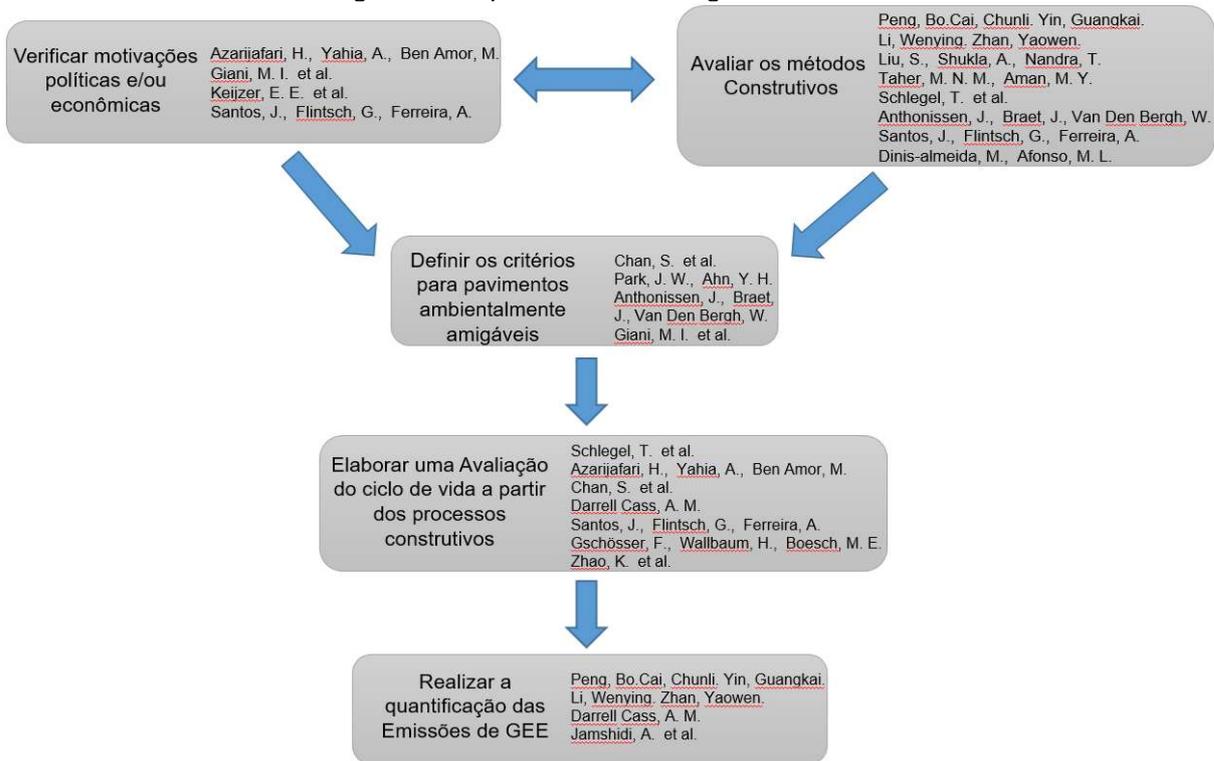
nacionais de transporte; seu objetivo é melhorar o desempenho do sistema de transporte, protegendo e melhorando o ambiente natural (FHWA, 2017). Tal incentivo fiscal é um dos fatores que impulsionaram pesquisas a respeito do tema conforme mostra a Figura 2.



Fonte: Autor.

Dos artigos estudados, verificou-se que a quantificação das emissões de gases de efeito estufa, os critérios para pavimentos ambientalmente amigáveis, métodos construtivos eficientes que visam minimizar o impacto ambiental, a avaliação do ciclo de vida e a motivação política/econômica são os principais critérios adotados pelos autores. Foi elaborado um mapa mental que demonstra na Figura 3 as principais vocações dos artigos estudados.

Figura 3 - Mapa Mental dos Artigos Estudados.



Fonte: Autor.

As atividades subjacentes à construção, operação e manutenção de infraestrutura rodoviária são notórias pela quantidade significativa de materiais e energia que consomem, enorme produção de resíduos e pelos consideráveis impactos ambientais gerados (PARK; AHN, 2015). Um modelo de uso de energia na produção de asfalto sugere que 8,5% da energia consumida é utilizada para extração de matérias-primas e aplicação do pavimento, 40% para produzir o aglutinante, 48% para misturar e secar o agregado e 3,5% para armazenar o ligante a uma temperatura funcional. As estimativas das emissões a montante variam consideravelmente devido às diferenças na análise do uso de energia na extração e refinação de petróleo bruto entre as frações. A energia necessária para misturar e secar 1 tonelada de asfalto com 5% de aglutinante é estimada em 318.649 BTUs nos Estados Unidos (HANSON; NOLAND; CAVELE, 2012). Resultados parecidos foram encontrados no trabalho de Anthonissen (2015), onde os mesmos afirmam que a produção de betume, o transporte e a energia para gerar calor são os maiores contribuintes para o impacto ambiental total (ANTHONISSEN; BRAET; VAN DER BERGH, 2015).

O pavimento projetado para um determinado ciclo de vida e seu respectivo dimensionamento define uma estrutura compatível com o tráfego esperado/calculado (número N) para tal período. Durante esse ciclo, o pavimento inicia uma condição boa até alcançar uma condição ruim. Este fato ocorre da deterioração do pavimento manifestada através de falhas e defeitos (DNIT, 2006).

Ao atingir uma condição ruim, ocorrem defeitos no pavimento e suas correções impactam o meio ambiente, pois conforme Peng *et al.* (2015), o setor dos transportes gera emissões de CO<sub>2</sub> que representam cerca de um terço das emissões totais de CO<sub>2</sub> das indústrias nacionais, sendo que aproximadamente 95% das emissões de gases poluentes são diretamente causadas pela construção e operação das infraestruturas de tráfego consumindo grande quantidade de energia e recursos ambientais.

O estudo do ciclo de vida do pavimento é uma ferramenta holística apropriada que pode ajudar os envolvidos a lidar com os aspectos ambientais da construção sustentável do pavimento. De fato, a avaliação do ciclo de vida ajuda a quantificar, analisar e comparar os diferentes impactos ambientais dos diversos tipos de pavimentos desde a extração da matéria prima até o final de sua vida útil (AZARIJAFARI; YAHIA; BEM AMOR, 2016). A avaliação de ciclo de vida é uma ferramenta de gestão ambiental sistemática, embora ainda em evolução, utilizada para avaliar os potenciais impactos ambientais e recursos consumidos ao longo do ciclo de vida de um produto, desde a perspectiva do “berço ao túmulo”, ou seja, desde a aquisição de matéria-prima até as fases de produção (SANTOS; FLINTSCH; FERREIRA, 2017). Gschösser (2012) cita que a avaliação do ciclo de vida é um método utilizado para analisar os fatores de impacto ambiental dos produtos e serviços. Este estudo utiliza também a regra de corte relativa à atribuição de materiais reciclados (ou seja, para a análise dos processos de produção, a atualização de materiais de reciclagem utilizáveis e parte do sistema de ciclo de vida anterior). Assim, o primeiro processo incluído no sistema analisado é o transporte da área de reciclagem para o local de produção. Porém as dificuldades na avaliação do ciclo de vida do pavimento betuminoso estão relacionadas com a complexidade do setor de asfalto e a variabilidade em vários parâmetros relacionados (ANTHONISSEN; BRAET; VAN DER BERGH, 2015).

Cass e Mukherjee (2011) verificou que através a Avaliação De Ciclo De Vida as emissões de carbono diminuem entre 32,30% e 35,93%, enquanto os custos diminuem entre 18,58% a 6,03%. O esquema proposto de redução de emissões e de poupança de energia pode fornecer uma base teórica e apoio técnico para o desenvolvimento de uma construção de estradas de baixo carbono. Os impactos de uso de equipamentos e transporte representam apenas 6-10% da emissão total durante a fase de construção.

A avaliação de ciclo de vida tem limitações pois a intenção de fornecer informações sobre o desempenho ambiental de vários produtos acaba por rotulá-lo comercial ou ambientalmente. As várias matérias-primas (primárias e/ou secundárias, tais como resíduos) disponíveis para a fabricação de misturas asfálticas são amplamente investigadas e em todas essas ocasiões, os limites do sistema, as unidades funcionais, as práticas de construção, as condições geotécnicas, a carga e a intensidade do tráfego podem ser diferentes, dificultando a adoção de uma única estrutura representativa. Além disso, o clima regional, as práticas locais de design, o orçamento, a vida útil, a disponibilidade de materiais e outros fatores tem um papel significativo no projeto da via (SCHLEGEL *et al.*, 2016).

Na verdade, essas diferenças inerentes a qualquer projeto de estrada demandam uma abordagem rigorosa que exige cálculos a serem feitos para cada local de construção específico para ter uma avaliação de ciclo de vida significativo (STRIPPLE, 2001). Portanto, cada avaliação de ciclo de vida é representativa de um dado estudo de caso e só pode ser extrapolada para outras situações se as principais limitações e suposições forem completamente conhecidas (CARLSON; GREENBER; KANNINEN, 2011). Além de diferenças no objetivo e no escopo, alguns dos estudos publicados foram ou estudos parciais de avaliação de ciclo de vida que cobrem somente aterros e construção de pavimentos (OLSSON; KARRMAN; GUSTAFSSON, 2006), ou estudos completos abrangendo todo o ciclo de vida de uma estrada que vai do berço ao túmulo (MROUEH *et al.*, 1999, 2001), (MILACHOWSKI; STENGEL; GEHLEN, 2011). Além disso, o objetivo e o escopo podem afetar outras características da avaliação de ciclo de vida, como a unidade funcional (incluindo o período de análise), as saídas ambientais e as fontes de dados. Por exemplo, uma avaliação comparativa de nível de projeto pode traçar

limites de sistema que excluam a iluminação, o consumo de combustível de trânsito, a carbonatação ou outros componentes que se supõe serem iguais entre alternativas concorrentes.

Os envolvidos no setor de pavimentos têm buscado novas soluções de engenharia para avançar para práticas de manejo de pavimentos mais amigáveis ao meio ambiente e economicamente viáveis. As abordagens gerais para melhorar o desempenho ambiental do pavimento incluem, entre outras, a redução do conteúdo de ligante virgem e agregado virgem em misturas de CBUQ, reduzindo a energia consumida e as emissões geradas na produção de misturas, aplicando técnicas de reciclagem in loco e implementando tratamentos preventivos (SANTOS; FLINTSCH, FERREIRA, 2017).

O CBUQ é produzido por pré-aquecimento do betume para diminuir a viscosidade e secagem do agregado para remover a umidade dele antes da mistura. A mistura é geralmente realizada em torno de 170 °C, mas irá variar dependendo das propriedades de mistura desejadas. A compactação e a aplicação da mistura devem ser feitas a temperaturas suficientemente altas. Este tipo de mistura é o método mais comum usado para superfícies rodoviárias. A maioria das misturas de asfalto recaem na categoria de asfalto de mistura quente que são produzidas a temperaturas de 150-190 ° C (LIU; SHUKLA; NANDRA, 2009).

Neste trabalho explorou-se procedimentos utilizados para quantificar a emissão dos gases de efeito estufa a partir da Mistura de Asfalto a Quente. A ferramenta PaLATE mede a sustentabilidade por meio da comparação entre consumo de energia e geração de gases poluentes. Ainda é possível simular soluções de pavimentos comparando com tratamentos típicos de reabilitação e reconstrução, que atenda às necessidades dos usuários atuais sem comprometer os das gerações futuras. Os principais critérios estabelecidos para um pavimento sustentável são a redução do uso de recursos naturais, consumo de energia e emissões de Gases De Efeito Estufa e ao mesmo tempo melhorar a segurança e conforto para o usuário (CHAN, *et al.*, 2011). O PaLATE foi projetado pelo Consórcio sobre Projeto e Manufatura Verde da Universidade da Califórnia-Berkeley (RCMC, 2016). Esta ferramenta avalia os efeitos ambientais e econômicos do pavimento e da construção de estradas. Os usuários inserem projetos iniciais, material de construção inicial, material e

processos de manutenção, equipamento e custo para um projeto. As saídas ambientais incluem:

- Consumo de energia (MJ);
- Consumo de água (kg);
- Emissões de dióxido de carbono (Mg);
- Emissões de NOx(kg);
- Emissões de material particulado-10 (kg);
- Emissões de dióxido de enxofre (kg);
- Emissão de monóxido de carbono (kg);
- Informação sobre o lixiviado (incluindo mercúrio, chumbo, resíduos perigosos RCRA gerados e potencial de toxicidade humana cancerígena e não cancerígena).

A ferramenta PaLATE também inclui uma avaliação econômica, que compara os custos associados a processos e materiais para um cenário base e alternativo ao longo da vida do projeto. A base de dados atualizada garantirá que os impactos do ciclo de vida calculados pelo programa sejam mais representativos das práticas atuais.

Em 2007, cerca de 1,6 trilhão de toneladas de asfalto foi produzido em todo o mundo. A Europa tem cerca de 4.000 locais de produção de asfalto e produz cerca de 435 milhões de toneladas métricas por ano. Na Europa, 90% das empresas envolvidas na produção e colocação de asfalto podem ser classificadas como pequenas e médias empresas (NAPA, 2011). Hoje, as agências públicas e os produtores de asfalto responsáveis pelas estradas estão enfrentando poucos fundos de investimentos disponíveis, juntamente com aumentos significativos no preço das operações de construção e aglutinantes de asfalto. Essas preocupações estão associadas a uma pressão significativa para construir, manter e reabilitar de forma sustentável os pavimentos e as agências devem procurar métodos alternativos de construção e manutenção, bem como materiais alternativos (GIANI *et al.*, 2015).

Construção de estradas consomem uma quantidade significativa de materiais e energia e produz uma enorme quantidade de resíduos. Por exemplo, 1 km de estrada típica de duas faixas com pavimento flexível consome 6 TJ de energia,

enquanto a emissão total de gases de efeito estufa associadas à construção de estradas está entre 0,15 e 0,7 t de CO<sub>2</sub>-e/m<sup>2</sup>. (PARK; AHN, 2015). Por isso, a definição de um método para quantificar o consumo de energia e emissão de poluentes se faz necessário dentro da gestão de pavimentos ambientalmente eficientes.

O PaLATE estima as emissões de poluentes do ciclo de vida para pavimentos de asfalto e concreto, base e componentes de enchimento para a sub-base. Este modelo aborda o descarte e reciclagem de materiais de projetos de transporte (ou seja, concreto e asfalto) e permite ao usuário especificar aditivos reciclados para inclusão em concreto e asfalto ou enchimento. Não são abordadas as emissões a montante e modela apenas o combustível diesel convencional. O poluente CO<sub>2</sub> é quantificado, mas neste estudo o CH<sub>4</sub> ou N<sub>2</sub>O não foi. O foco aqui é sobre o aquecimento necessário para misturar aglomerante de asfalto com agregados e seu processo construtivo. As emissões diretas de gases de efeito estufa deste processo incluem produtos de combustão associados com aquecimento, evaporação e combustão não intencional do material aglutinante em pequena escala quando ele é aquecido a altas temperaturas (HANSON; NOLAND; CAVELE, 2012).

Conforme Hanson *et al.* (2012), uma análise laboratorial mostrou uma forte correlação entre as emissões de CO<sub>2</sub> e a temperatura de aquecimento (R<sup>2</sup> = 0,976). A temperatura de aquecimento, a quantidade de aglutinante que a mistura asfáltica morna (WMA na sigla em inglês) utilizada e a quantidade de asfalto adicionado foram as suas variáveis independentes. Esta é uma forte evidência de que a temperatura de produção é uma abordagem de modelagem válida e simples para estimar as emissões de gases de efeito estufa para a mistura de asfalto. Na Tabela 3 foi utilizado CBUQ com 5% de aglutinante para uma vida útil de 15 anos x 2.

Tabela 3 Emissão de GEE na prod. de CBUQ.

Poluente	A montante (kg/faixa/ milha)	Direto (kg/faixa/ milha)	Fugitivo (kg/faixa/ milha)	TOTAL (kg/faixa/ milha)
CO <sub>2</sub>	250.585,68	115.189,20	142,25	355.482,53
CH <sub>4</sub>	1.480,09	1,67	2,85	1.427,03
N <sub>2</sub> O	4,09	1,75	na	5,67
CO <sub>2</sub> e	282.933,32	115.766,50	202,21	387.205,79

Fonte - Adaptado de Hanson *et al.* (2012).

O CO<sub>2</sub>e, dióxido de carbono equivalente, é a compensação de outros gases de efeito estufa para créditos de carbono, onde um crédito de carbono é o equivalente a uma tonelada de CO<sub>2</sub>.

As entradas do modelo propostos por Hanson (2012) são temperatura de aquecimento, teor de aglutinante e teor de umidade no agregado. Os requisitos de aquecimento para aglutinante e agregado são estimados, assim como a temperatura específica para aquecer a umidade no agregado até ao ponto de ebulição, o calor latente para evaporar a umidade e a temperatura específica para aquecer o vapor até à temperatura de produção alvo. A temperatura específica para o aglutinante é estimada a partir dos valores de calor específicos médios a 16°C e 163°C a 0,468 BTU/°F/lb. O calor latente necessário para evaporar a água é de 970 BTU/lb. A temperatura ambiente considerada é de 16 ° C.

A menos que a mistura não seja aquecida acima do ponto de ebulição da água, há calor latente. A água é aquecida até um máximo de 100 °C, e o vapor é aquecido de 100 °C para a temperatura de aquecimento final. Os agregados e o aglutinante são aquecidos da temperatura ambiente até à temperatura de aquecimento final.

O processo de hierarquia analítica utilizado para estabelecer o sistema de construção do pavimento asfáltico, a partir de uma matriz de julgamento, permite o cálculo do coeficiente de peso de cada fase no que tange a emissão de poluentes do efeito estufa. As etapas de aquecimento do agregado, aquecimento de asfalto e a mistura do asfalto/agregado foram definidas como etapas-chave da construção de pavimentos asfálticos pois as emissões de carbono nestas fases representaram cerca de 90% das emissões totais (PENG *et al.*, 2015; CASS; MUKHERJEE, 2011).

Neste método de avaliação, considera-se que o processo de construção da pavimentação asfáltica tem duas fases distintas, a produção da mistura asfáltica e a construção com a mistura asfáltica, sendo que a produção da mistura de asfalto inclui armazenamento de agregado e seu fornecimento, aquecimento de asfalto, aquecimento do agregado e também da mistura asfalto/agregado. Neste estudo serão abordadas apenas o aquecimento na produção da mistura asfalto/agregado como fonte poluente. A Tabela 4 mostra o peso em relação a emissão de poluentes por etapa.

Tabela 4 - Emissão de Carbono nas Etapas Chave.

Estágio	A (%)	B (%)	C (%)
Aquecimento do Agregado	65.39	69.00	65.36
Aquecimento do Asfalto	15.24	14.93	13.00
Mistura Asfalto/ agregado	12.87	10.33	13.67

Fonte - Peng *et al.*(2015).

A coluna “A” denota o processo de aquecimento asfáltico com carvão e processo de aquecimento agregado com óleo pesado, “B” é para aquecimento asfáltico e processo de aquecimento agregado com óleo pesado e “C” significa aquecimento de asfalto e processo de aquecimento de agregados com gás natural.

A Tabela 3 mostrou que de fato as grandes concentrações de emissão de poluente estão nessas etapas, não importando qual o tipo de combustível utilizado no aquecimento.

Peng *et al.* (2015) apresentou o peso de cada fase do processo da mistura asfáltica a partir de uma matriz que, segundo o estudo, apresentou consistência satisfatória na hierarquia analítica e resultou nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Emissão de Carbono por estágio. Continua.

Estágio	Peso
Empilhamento do Agregado	0,03389
Fornecimento do Agregado	0,03040
Aquecimento do Agregado	0,41300
Aquecimento do Asfalto	0,23350
Mistura Asfalto/Agregado	0,15220
Transporte da Mistura	0,01770
Aplicação da Mistura	0,03950
Compactação da Mistura	0,07480
TOTAL	1,0000

Fonte: Traduzido de (PENG *et al.*, 2015).

Tabela 6 - Redução das emissões nos estágios chave.

Estágio	Medida	Redução (mg)	Redução (%)	Taxa de redução de Custo (%)
Aquecimento do Agregado	Óleo p/ gás	6110,6	-27,72	-18,63
Aquecimento do Asfalto	Carvão p/ Óleo	955,18	-18,34	350
	Óleo p/ Carvão	1171,197	-27,53	-18,49
	Carvão p/ Gás	2126,377	-40,82	267

Fonte – Traduzido de (PENG *et al.*, 2015).

Conforme Peng *et al* (2015), as principais fontes de energia são óleo pesado e gás natural na fase de aquecimento agregado. Nessa etapa, as emissões de carbono e os custos se reduziram em 27,72% e 18,63% quando o gás natural substituiu o óleo pesado. Na fase de aquecimento asfáltico, foram comparadas três formas de reduzir as emissões de carbono, o carvão para o óleo pesado, o carvão para o gás natural e o óleo pesado para o gás natural. As emissões de carbono podem reduzir 18,34% quando o óleo tomou o lugar do carvão, mas o custo aumentaria. As emissões de carbono e o custo podem reduzir em 27,53% e o efeito da poupança de energia e redução de emissões foi notável quando o gás natural foi utilizado ao invés do óleo pesado. As emissões de carbono reduziram em 40,82%, mas o efeito de redução foi melhor quando o gás natural substituiu o carvão e os dados estão resumidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Economia energética e redução de emissões.

Estágio	Medida	Econômica de Energia (MJ)	Redução de Emissão (mg)	Redução de Emissão (%)	Taxa de redução de Custo (%)
Aquecimento do Agregado	Óleo p/ Gás	33,95	6.110,60	27,70	- 18,63
	Com proteção de intempéries	20,63	1.224,19	5,60	-
Aquecimento do Asfalto	Óleo p/ Gás	6,59	1.117,20	27,50	- 18,49
	Carvão p/ gás	10,96	2.126,38	40,82	267,00
Total (Óleo p/ gás)		61,17	8.505,99	32,30	- 18,58
Total (Carvão p/ gás)		65,54	9.461,17	35,93	- 6,03

Fonte: Traduzido de (PENG *et al.*, 2015).

Outro resultado significativo da pesquisa foi que a umidade tem relação direta com o consumo de combustível de aquecimento, onde cada por cento de umidade aparente reduzida do agregado implica em uma redução de 9,17% no consumo de energia, 8,92% de diminuição de emissões de poluentes e 9,30% de economia financeira com queima de combustíveis.

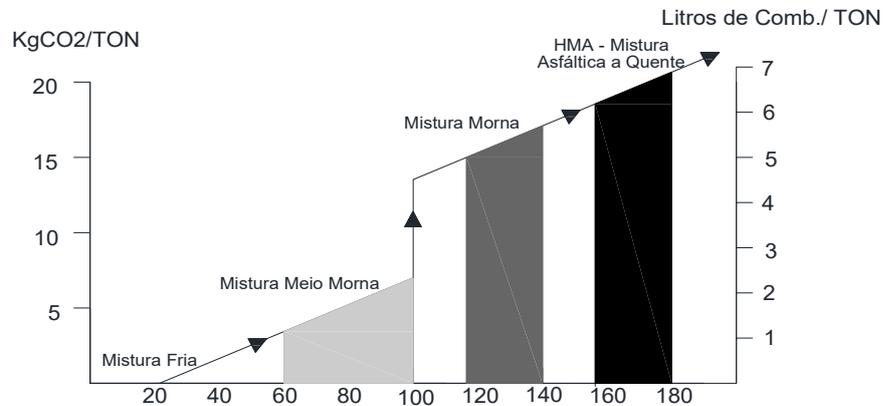
A reciclagem do pavimento associado ao asfalto de mistura morna (WMA) pode ser vista como uma opção sustentável, pois traz benefícios sociais, ambientais e econômicos. O uso de mistura morna traz vantagens devido ao menor consumo de energia necessária em seu processo, implicando assim em reduções de 30,00% a 40,00% das emissões de dióxido de carbono e permitindo um ambiente de trabalho mais confortável, garantido por uma redução de 30,00 e 50,00% de fumaça aos

trabalhadores das usinas betuminosas e das equipes de pavimentação. A redução de emissões permite que fábricas de asfalto de mistura morna estejam localizadas mais próximas a áreas urbanas (DINIS-ALMEIDA; AFONSO, 2015). Países como a Dinamarca e os Países Baixos utilizaram 100% de RAP enquanto a Suécia e a Alemanha reciclaram 95% e 55% de material de superfície de asfalto respectivamente (TAHER; AMAN, 2016). O mesmo autor cita que, entretanto, a performance da mistura utilizando RAP pode ser diferente da que usa exclusivamente material virgem pois sua produção exige consumo de energia e fissuras e buracos podem aparecer mais facilmente tendo uma vida útil menor que a mistura com material virgem.

Na utilização do WMA ao invés do CBUQ convencional, utiliza-se betume modificado, normalmente adicionando-se espuma, com a finalidade de baixar a viscosidade para que a mais baixas temperaturas o betume atinja as propriedades necessárias da mistura e consiga receber a energia de compactação em tempo hábil de execução, sendo esta a maior resistência construtiva encontrada neste método (KUCUKVAR, *et al.*, 2014). O mesmo autor cita que o WMA não atingiu um melhor desempenho em termos de impactos ambientais em comparação com o CBUQ. No entanto, eles apareceram melhor quando os indicadores socioeconômicos de sustentabilidade foram considerados. Essa tecnologia (WMA) ainda não ganhou aceitação ampla na indústria de asfalto. Para alcançar uma implementação generalizada, é necessário provar que o WMA possui características iguais ou melhores no desempenho de longo prazo do CBUQ. Asfalto reciclado e asfalto morno tornaram-se os principais métodos para melhorar a sustentabilidade na indústria de asfalto nos últimos anos (TAHER; AMAN, 2016). A introdução de 20% de RAP no CBUQ convencional requer energia de aquecimento adicional para a obtenção da viscosidade de ligante necessária. Pode ser visto que esta demanda de energia supera a redução de energia por causa da distância de transporte mais curta para RAP que para agregado virgem. No entanto, quando a tecnologia WMA é aplicada com conteúdo de RAP de 40% a demanda de energia é reduzida em 14% em comparação ao CBUQ com 20% de RAP e 10% em comparação ao CBUQ de referência (ZAUMANIS; JANSEN; SMIRNOVS, 2011).

A Figura 4 mostra essa comparação entre os métodos de produção da mistura asfáltica.

Figura 4 - Comparativo entre os tipos de aquecimento.



Fonte – Adaptado de (TAHER; AMAN, 2016).

O aquecimento da mistura é determinante para se definir o impacto ambiental. A mistura WMA, que é produzida pela adição de emulsionantes, que podem ser ceras e até mesmo água para o betume antes de misturar, reduzindo sua viscosidade e permitindo que as temperaturas de mistura e de colocação sejam significativamente mais baixas, geralmente em torno de 100-140°C, consome de 10 a 24% menos energia que o CBUQ (LIU; SHUKLA; NANDRA, 2009; JAMSHIDI *et al.*, 2012). Em países como a Holanda, as pesquisas sobre asfalto de baixa energia estão mostrando resultados de até 30% menos emissões de poluentes (KEIJZER *et al.*, 2015). Uma ferramenta de avaliação do ciclo de vida fácil de usar seria benéfica na avaliação dos benefícios ambientais do WMA em comparação com o CBUQ, no entanto, desenvolver um modelo de cálculo completo para a avaliação do ciclo de vida é muito complexo. Isso se deve principalmente à quantidade de informação que precisa ser incluída, muitas variáveis e perguntas sobre o desempenho a longo prazo dos pavimentos WMA que precisam ser respondidos (ZAUMANIS; JANSEN; SMIRNOVS, 2011).

Um Ato Internacional aprovado pelo Poder Legislativo revoga tacitamente as disposições legais contrárias, em razão da natureza da norma jurídica através da qual este é aprovado e o acordo Quadro Sobre O Meio Ambiente Do Mercosul, que trata da necessidade de cooperar para a proteção do meio ambiente e para a utilização sustentável dos recursos naturais, com vistas a alcançar a melhoria da

qualidade de vida e o desenvolvimento econômico, social e ambiental sustentável (BRASIL, 2003) garante sua exigibilidade.

Com a extinção do DNER e a criação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, através da Lei n. 10.233 /2001, a manutenção das rodovias federais passou a ser de responsabilidade desta. Em seu Manual de conservação Rodoviária, o DNIT define o tratamento ambiental em etapas de trabalho (DNIT, Brasília, 2005), sendo elas:

- Elaboração dos Estudos e Projetos Ambientais;
- Implantação/Implementação do PBA – Projeto Básico Ambiental;
- Monitoramento Ambiental na fase de Operação.

Atividades de manutenção e/ou implantação de melhoramentos da rodovia, em função de sua natureza e magnitude, deverão conduzir à elaboração de estudos e definições de medidas e Programas Ambientais, bem como respectivas implementações e implantações, e para cada um dos componentes ambientais serão definidas medidas de caráter mitigador e/ou compensatório a serem implementados *pari-passu* com a execução dos serviços e obras pertinentes ao empreendimento rodoviário (DNIT, 2006).

Os autores dos artigos estudados apresentaram a dificuldade de uma correta avaliação de emissão de poluentes como o maior desafio para uma análise precisa e confiável, pois a análise do ciclo de vida é principalmente subjetiva (AZARIJAFAR, 2016). As diversas variáveis na construção e manutenção de uma rodovia impossibilitam conclusões precisas a respeito da emissão de poluentes de maneira genérica, devendo o pesquisador utilizar as considerações de cada caso a respeito do início e final da vida do pavimento (GSCHÖSSER; WALLBAUM; BOESH, 2012).

Na mistura do asfalto/agregado, por envolver grande quantidade de energia no processo, deve ser considerada uma etapa chave de emissão de poluentes e os estudos devem se concentrar na eficiência desse processo. A utilização de aditivos mostrou-se eficiente na redução do consumo e da diminuição da emissão de poluentes por parte do CBUQ (SCHLEGEL *et al.*, 2016).

A energia (Q) necessária para aquecer materiais é o produto do valor de calor específico (c), da massa do material (m) em libras e do diferencial de temperatura ( $\Delta T$ ) em graus Fahrenheit e pode ser expresso como a Equação 1:

$$Q = c \cdot m \cdot T \quad \text{Eq. (1)}$$

- Q = Energia em Joules;
- c = Calor específico em Btu/lb;
- m = Massa em libras;
- T = Diferencial de temperatura em Fahrenheit.

Utilizam-se os seguintes valores de calor específicos:

- c(água) = 1.00 Btu/lb,
- c(vapor de água) = 0.50 Btu/lb,
- c(agregados) = 0.22 Btu/lb.

Este modelo estima que o consumo de energia para aquecer 1 tonelada de HMA a 325 ° F (163 ° C) com 5% de aglutinante e 4% de umidade no agregado é de 216.461,00 Btu a 100% de eficiência. Esta estimativa não considera o calor residual ou a energia de mistura. Também não considera a energia necessária para manter o ligante à temperatura de mistura (HANSON; NOLAND; CAVELE, 2012).

Com os dados de energia e emissão de poluentes consumidos para a manutenção do trecho em estudo, a pesquisa pretende identificar quais os melhores meios para mitigar o impacto ambiental deste processo no que tange a emissão de CO<sub>2</sub>, minimizando seu custo ambiental, prezando a sustentabilidade e a harmonia com o meio ambiente impactado pelas obras de infraestrutura rodoviária.

### 3.2 Sistema Normativo

A sociedade buscou uma forma de equilíbrio entre os meios necessários e os fins almejados, que se configurou no controle ambiental dos processos produtivos e de consumo e, posteriormente, na gestão da qualidade ambiental dos mesmos, na qual se buscou o controle dos serviços, produtos, e atividades em função da prevenção dos danos ambientais gerados. Inicialmente, surgiram na área de qualificação técnica das atividades as normas internacionais da qualidade de serviços e produtos pela BS 5750 do Reino Unido acompanhada pela ISO 9000, de âmbito internacional

e, posteriormente, na área ambiental a BS 7750 (Reino Unido) e a ISO 14000 (internacional). A última versão da Norma ISO 14.001 (2004) exige o levantamento de toda a legislação aplicável às atividades de uma organização ou empreendimento.

A observância de uma norma técnica é obrigatória quando adotada através de uma norma jurídica, como por exemplo, as Normas Técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO e as Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Da mesma forma, também são de observância obrigatória, as Normas Técnicas do DNIT expedidas no exercício de suas atribuições e esfera de atuação legais, amparadas pelos incisos I e II do Artigo 82, da Lei nº 10.233, de 05/06/2001.

Santos (2015) cita que a legislação ambiental brasileira é considerada rigorosa e uma das mais completas do mundo, ela contribui para a preservação de biodiversidade, dos recursos hídricos, qualidade do solo e ar, além de garantir a preservação e recuperação de ecossistemas, porém existe a falta de fiscalização, derivada da grande extensão de terra, restrições de informações e custo de tempo e pessoal para vistoria em campo (SANTOS; NUNES FILHO, 2015).

Isto mostra a relevância e importância da preocupação ambiental nas obras relacionadas a infraestrutura de transportes, pois como a legislação ambiental brasileira é considerada uma das mais avançadas do mundo, deve-se reconhecer, também, que seu volumoso ordenamento jurídico e a dinâmica geração de normas têm dificultado sua correta aplicação (DNIT, 2006).

## 4 MÉTODO

Nas simulações propostas por este trabalho acadêmico, foram feitas coletas de dados secundários do próprio DNIT, e recalculado o volume de tráfego na rodovia BR 262 considerando o aumento do tráfego e o impacto operacional desse acréscimo foi dimensionado. Com esses novos valores, foram quantificados os impactos ambientais da nova demanda.

Para redimensionar o tráfego da rodovia a partir do aumento da produção de celulose, se determinou a projeção do tráfego futuro, pois as rodovias devem ser projetadas para que proporcionem um nível de serviço aceitável durante sua vida útil, e para isso deve ser determinado com o maior grau de exatidão possível qual será o volume e a distribuição do tráfego para aquele período (DNIT, 2006).

Foi gerado um modelo de projeção de tráfego com base na análise de regressão linear que consiste em estabelecer funções matemáticas capazes de representar o relacionamento existente entre duas ou mais variáveis. Há dois tipos de análise de regressão a considerar: regressão simples e regressão múltipla, sendo que a simples consiste na determinação de uma função envolvendo apenas duas variáveis: variável independente e variável dependente, e que melhor se ajuste a um conjunto de pares de valores dados, enquanto que a regressão múltipla consiste na determinação de uma função envolvendo mais de duas variáveis, sendo uma dependente e as demais independentes, e que melhor se ajuste a um conjunto de grupos de valores dados.

Os parâmetros utilizados na ferramenta PaLATE e os dados utilizados foram confirmados em laboratório, e com os parâmetros estabelecidos, foram realizados os cálculos dos consumos energéticos e emissão de poluentes para as simulações propostas.

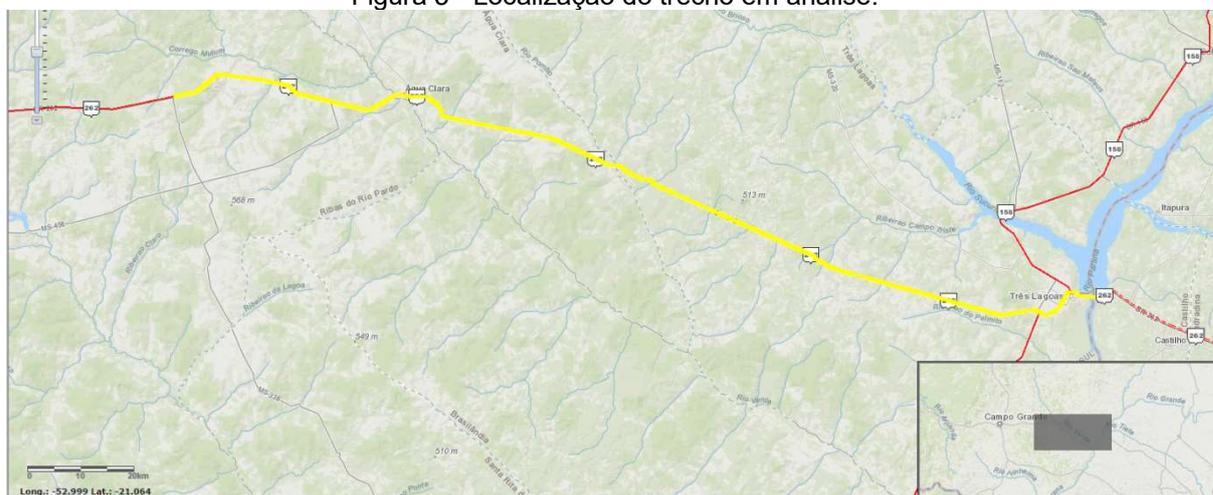
### 4.1 Geotecnologias

As geotecnologias e suas ferramentas contribuem para a elaboração de projetos cuja finalidade pode ser voltada para planejamento regional, por exemplo. Envolvem pessoas de diversas áreas de conhecimento, integram dados e permitem que programas voltados para o desenvolvimento contemplem toda região de forma homogênea, ao considerar a realidade dos municípios e a vulnerabilidade do meio

físico que o comporta. O Sensoriamento remoto e o Sistema de Informações Geográficas são ferramentas que compõem as geotecnologias (AQUINO, VALLADARES, 2013).

O DNIT possui ferramentas que auxiliam no georreferenciamento das estradas, como o DNIT GEO (DNIT, 2018), tal ferramenta proporciona maior facilidade na elaboração dos projetos e na definição das distancias médias de transportes, proximidade de fonte de recursos, fundamental para determinação dos custos das obras. Auxilia também na determinação das distancias dos trechos para quantificação dos estudos, como é o caso deste trabalho. A Figura 5 ilustra o segmento em análise.

Figura 5 - Localização do trecho em análise.



Fonte: Autor.

## 4.2 Estudo De Tráfego

É uma das mais importantes etapas no desenvolvimento de um projeto de restauração rodoviário, objetivando que as soluções sejam adotadas adequadamente conforme as solicitações previstas.

Os métodos de projetos de pavimentação e restauração dos pavimentos preconizados pelo DNIT objetivam se adequar uma estrutura de pavimento às solicitações de tráfego previstas, de forma a permitir o adequado deslocamento dos usuários pelas rodovias. Nos métodos de projeto nacionais, todo o tráfego previsto ao longo do horizonte de projeto é convertido em termos de solicitações equivalentes do eixo padrão rodoviário (um eixo simples de rodagem dupla com

carga de 8,2t, denominado Número “N”). Na determinação do Número “N” são considerados fatores relacionados com a composição do tráfego e referidos a cada categoria de veículo, definida em função da carga transportada e do número de eixos dos veículos (DNIT, 2006).

Tem-se, então, que o aumento da carga por eixo, para um dado volume de tráfego diário e sua respectiva composição, implica num incremento exponencial do número “N”, que é o parâmetro primordial de projeto e para análise de desempenho de um pavimento (DNIT, 2006).

Para que seja possível determinar o número “N” foi necessário realizar pesquisa volumétrica classificatória no segmento estudado, para tal, foi realizado posto de pesquisa no posto da PRF de Água Clara localizada no KM 141 da rodovia, entre os municípios de Água Clara e Ribas do Rio Pardo.

A correta avaliação da solicitação que o pavimento em análise já sofreu pelo tráfego é fundamental para o diagnóstico preciso do pavimento existente. Para o dimensionamento do reforço ou a definição de outras intervenções é necessária a determinação do tráfego futuro. Em qualquer caso, o desejável é que sejam definidos os seguintes elementos relativos ao tráfego:

- Volume médio diário anual (VMDa);
- Classificação da frota;
- Carregamento da frota;
- Fator de equivalência de carga;
- Número equivalente “N”.

De posse desses valores, definiu-se o número “N” como sendo  $3,08E+0,7$  para USACE e  $7,57E+06$  para AASHTO para um período de 10 anos. Os números foram obtidos a partir da fórmula representada na Equação 2.

$$N_i = 365 \times FR \times FP \times FV \times (t_i \times VMDAT) \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

- $N_i$  = Número total de repetições do eixo simples padrão de 8,2 toneladas, ao longo de “i” anos;

- FR = Fator climático regional (FR = 1,0 DNER Manual de Pavimentação, 1996);
- FP = Fator de pista ( FP = 0,5, considerando-se a distribuição do tráfego para cada faixa de rolamento);
- FV = FC x FE, o fator de Veículos foi determinado em função da composição e da configuração de eixos da frota de veículos comerciais que demandam o trecho considerando os dois métodos usuais de dimensionamento de pavimentos recomendados pelo DNIT (2006), a saber “pavimentos novos – Método do Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE)” e “restauração – Método da American Association of Highway and Transportation Officials (AASHTO)”, sendo: FC = Fator de carga e FE = Fator de Eixos;
- ti = Número de anos até o ano “i” de projeção da frota de veículos;
- VMDATcmi = Média do volume médio diário total de tráfego comerciais (ônibus + caminhões + semirreboques + reboques) em 2 sentidos, entre o ano de abertura e o fim de “i” anos.

O fator de veículo utilizado para o cálculo do “N” foram os preconizados pela AASHTO e pela USACE conforme os manuais do DNIT e representados pela Equação (3).

$$F_v = F_e \times F_c \quad \text{Eq. (3)}$$

onde:

Fe = fator de eixo;

Fc = fator de equivalência de carga.

O carregamento máximo permitido pela Lei da Balança (Código de Trânsito Brasileiro - Lei nº 9.053 de 23.09.1997 – resolução no 12 de 06/02/1998) é de 6,0 tf no eixo simples dianteiro é de 10,0 tf, 17,0 tf e 25,5 tf para os eixos simples, tandem duplo e tandem triplo traseiros, respectivamente.

As taxas de crescimento do tráfego poderão tanto se basear nas eventuais séries históricas existentes como na associação a dados socioeconômicos regionais. Assim, por exemplo, a evolução da população e da renda per capita tem íntima

vinculação com o crescimento da frota de automóveis, enquanto a produção agropecuária e industrial e a venda de óleo diesel podem ser associadas ao crescimento da frota de carga.

A classificação mínima útil à avaliação do tráfego compreende as seguintes subclasses de veículos de carga: caminhão leve, caminhão médio, caminhão pesado, reboque/semirreboque. No entanto, é preferível que a classificação seja mais detalhada, pois podem ocorrer expressivas variações na capacidade de carga de uma determinada subclasse, em função do tipo de veículo e de sua rodagem. Assim, os semirreboques foram classificados em: 2S1; 2S2; 3S2, 2S3; etc. onde na condição adotada, o primeiro algarismo representa o número de eixos do cavalo mecânico e o segundo, o número de eixos do semirreboque.

Observa-se que o elevado número “N” encontrado se dá pelo fator de veículo, onde os veículos do tipo reboque têm elevada contribuição no tráfego.

O manual de estudo de tráfego do DNIT traz as tabelas do cálculo dos fatores de carga para o método da AASHTO e USACE, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Método AASHTO para Fc.

Tipos de Eixo	Equações (P em tf)
Simple de rodagem simples	$FC = (P / 7,77)^{4,32}$
Simple de rodagem dupla	$FC = (P / 8,17)^{4,32}$
Tandem duplo (rodagem dupla)	$FC = (P / 15,08)^{4,14}$
Tandem triplo (rodagem dupla)	$FC = (P / 22,95)^{4,22}$

Fonte: DNIT, 2006.

E para o método USACE conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Método USACE para Fc.

Tipos de Eixo	Faixas de Cargas (t)	Equações (P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 – 8	$FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0 - 11	$FC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tandem triplo	0 - 18	$FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

Fonte: DNIT, 2006.

Como resultado dos cálculos do obteve-se a Tabela 10 de resultado e o número a ser considerado nas iterações par avaliação do ciclo de vida das soluções propostas foi o 7,57E+06.

Tabela 10 - Número N

USACE=	1,43E+07	AASHTO=	3,51E+06
USACE=	3,08E+07	AASHTO=	7,57E+06
FV USACE=	13,27	FV AASHTO=	3,27

Fonte: Autor.

#### 4.3 Análise Do Pavimento

Com o número “N” encontrado e baseado nas normativas vigentes foi determinado a espessura da camada de rolamento conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Espessura da camada asfáltica em relação ao número "N".

Parâmetro de Tráfego	Tipo e Espessura
$N \leq 10^6$	Tratamentos Superficiais Betuminosos
$10^6 \leq N \leq 5 \times 10^6$	Revestimento Betuminoso com 5,00cm
$5 \times 10^6 \leq N \leq 10^7$	Revestimento Betuminoso com 7,50cm
$10^7 \leq N \leq 5 \times 10^7$	Revestimento Betuminoso com 10,00cm
$5 \times 10^7 \leq N$	Revestimento Betuminoso com 12,5cm

Fonte: DNIT, 2006.

Conforme a tabela apresentada, a espessura adotada para o tráfego determinado foi de 10,00cm, mas por se tratar de uma reabilitação, se faz necessárias a análise do pavimento e sua avaliação estrutural para definir qual intervenção a ser tomada, como reforço ou reconstrução. Para o cálculo da espessura de reforço estrutural simples utilizando a norma técnica DNER-PRO 011/94 deve-se conhecer os seguintes parâmetros, por segmentos homogêneos:

- N - Número de solicitações de eixos equivalentes a eixo padrão de 8,2 t;
- Dp - deflexão de projeto, em 10-2mm;
- R - Raio de curvatura, em m;
- Dadm - deflexão admissível, em 10-2mm;
- IGG - Índice de Gravidade Global.

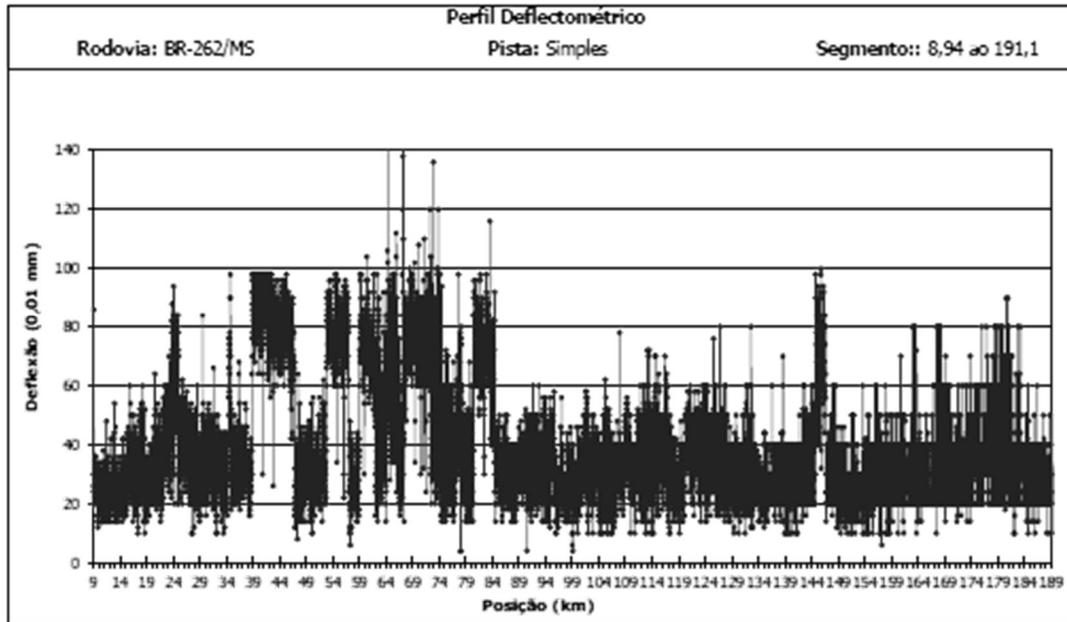
Estão elencados os dados da pista, situação estrutural, critérios e medidas a serem tomadas. No segmento em estudo, a solução reconstrução foi a adotada, seguindo os critérios da norma vigente DNER PRO 11/79:

- Faixa 1:  $D_c/D_{adm} < 1,1$  – Pavimento sem problemas estruturais;
- Faixa 2:  $1,1 < D_c/D_{adm} < 1,5$  – Pavimento com deficiência estrutural leve;
- Faixa 3:  $1,5 < D_c/D_{adm} < 2,0$  – Pavimento com problemas estruturais;

- Faixa 4:  $D_c/D_{adm} > 2,0$  – Pavimento com grandes problemas estruturais.

A Figura 6 representa a deflectometria encontrada no segmento.

Figura 6 - Perfil Deflectométrico do Segmento



Fonte: Autor.

Foram realizados os ensaios de Levantamento Visual Contínuo (LV) conforme normativa DNIT-PRO-006/2003, 007/2003 e 008/2003, onde, no caso do IGG – Índice de Gravidade Global, a degradação do pavimento é dada seguindo os critérios conforme Tabela 12.

Tabela 12- Conceito de Degradação do Pavimento.

Conceitos	Limites
Ótimo	$0 < IGG \leq 20$
Bom	$20 < IGG \leq 40$
Regular	$40 < IGG \leq 80$
Ruim	$80 < IGG \leq 160$
Péssimo	$IGG \leq 160$

Fonte: DNIT, 2006.

Dado pela seguinte fórmula representada na Equação (4).

$$IGG = \sum IGI \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

IGI = Somatório dos índices de gravidade individuais.

O índice de gravidade global deve ser calculado para cada trecho, sendo seu cálculo representado pela Equação 5 e a Tabela 13 demonstra os índices de ponderação.

$$IGI = fr \times fp \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

fr = frequência relativa;

fp = fator de ponderação, valores tabelados;

A Equação 6 refere-se a frequência relativa.

$$Fr = \frac{fa \times 100}{n} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

fa = frequência absoluta;

n = número de estações inventariadas.

Tabela 13 - Fator de ponderação. Continua.

Ocorrência Tipo	Codificação de ocorrências de acordo com a Norma DNIT 005/2002-TER "Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia"	Fator de Ponderação fp
1	Fissuras e Trincas Isoladas (FI, TTC, TTL, TLC, TLL e TRR)	0,2
2	FC-2 (J e TB)	0,5
3	FC-3 (JE e TBE) NOTA: Para efeito de ponderação quando em uma mesma estação forem constatadas ocorrências tipos 1, 2 e 3, só considerar as do tipo 3 para o cálculo da frequência relativa em percentagem (fr) e Índice de Gravidade Individual (IGI); do mesmo modo, quando forem verificadas ocorrências tipos 1 e 2 em uma mesma estação, só considerar as do tipo 2.	0,8
4	ALP, ATP e ALC, ATC	0,9
5	O, P, E	1
6	EX	0,5
7	D	0,3
8	R	0,6

Fonte: DNIT, 2006.

Assim, determinou-se a reconstrução do pavimento em estudo com a total remoção da camada de rolamento existente e reforço de sua base com melhoramento devido a adição de cimento. Por se tratar de um trabalho científico, foi considerada a adição de RAP tanto na camada final quanto na camada de enchimento conforme as simulações propostas.

Para fins de cálculo, considerou-se que a média de espessura do pavimento a ser removido é de 8,00cm e então recomposta com uma camada de 10cm, além da

recuperação da camada de base. Neste primeiro momento foi considerado a total remoção da camada de rolamento existente, 40% desse volume foi aproveitado na recomposição da base com adição de 3% de cimento em ordem de peso e o restante do material fresado descartado no acostamento da via, sem reaproveitamento. Na manutenção considerou-se a aplicação de micro revestimento asfáltico dentro do período de análise, para aproximar os cálculos da realidade da pista. Os limites do sistema cobrem o ciclo de vida da extração de matérias-primas até o fim da vida útil do projeto.

Avaliações de ciclo de vida parciais que se concentram apenas na fase de construção e / ou manutenção devem ser usados com cautela, pois podem levar a decisões erradas se os cenários de durabilidade e manutenção forem diferentes. As tecnologias de construção sustentável não devem considerar apenas o impacto ambiental quantificado pela avaliação de ciclo de vida, mas também os impactos econômicos e sociais (SCHLEGEI *et al.*, 2016). Evitar etapas de manutenção significa menos obras nas estradas, menos engarrafamentos e, conseqüentemente, menos emissões de CO<sub>2</sub>.

A consideração sobre a produção da mistura asfáltica foi de uma usina com filtros, de produção controlada no tambor e, no primeiro momento, aquecida a óleo.

Conforme proposta do trabalho, a partir das camadas definidas, serão executadas interações na ferramenta PaLATE para determinar quais técnicas construtivas contribuem mais para a emissão do poluente CO<sub>2</sub>.

Dentre as interações previstas, o traço da Mistura Asfáltica Usinada a Quente segue um padrão pré-estabelecido, cuja a dosagem enquadra-se no projeto apresentado conforme a Tabela 14. O traço apresentado foi a referência para as interações no PaLATE e representa 01(uma) tonelada de CBUQ.

Tabela 14 - Traço de Mistura Asfáltica.

TRAÇO (Mistura)	Agregado Pétreo	Cap 50-70
Densidades	1,704 ton/m <sup>3</sup>	0,642 ton/m <sup>3</sup>
Volume	0,568 m <sup>3</sup>	5,00%
Peso	0,968 Ton	0,032 Ton

Fonte: Autor.

Ao considerar-se um quilometro de via tem-se o seguinte volume de CBUQ a ser produzido conforme Equação 7 utilizando os dados da Tabela 18;

$$Volume = Largura \times Comprimento \times Espessura \quad \text{Eq. (7)}$$

$$Volume = 1.200,00m^3$$

O PaLATE considera também as manutenções no segmento e determina suas emissões do início ao fim do projeto. Para tal, estipulou-se uma média anual de  $5m^3/(km.faixa)$  de consumo de CBUQ onde tal quantidade é considerada um nível de esforço médio conforme os manuais do DNIT (DNIT, 2006), tal valor foi utilizado como critério pois no início da vida do projeto o consumo tende a ser menor do que ao final – considerando 10 anos de vida útil pois este é o tempo de durabilidade de uma mistura asfáltica clássica (SCHLEGEL *et al.*, 2016). Foi eleito o km 126 da rodovia da rodovia BR 2626/MS para simularmos as interações na planilha, tal critério foi adotado para que as distancias de transportes tivessem um peso importante na composição das emissões e não distorcendo os resultados aproximando-os a situações consideradas ideais.

A planilha não está programada para utilizar outros combustíveis no aquecimento da mistura/agregado como o gás natural por exemplo, porém ela indica quais os fatores e o potencial térmico do combustível em questão sendo o poder calorífico do óleo diesel de 128.700,00Btu/gal e do gás de 93.000,00 Btu/gal. As Tabelas 15 e 16 demonstram os fatores de eficiência e de emissões dos combustíveis citados.

Tabela 15 - Propriedades do Diesel.

DIESEL	
Porcentagem em peso de Carbono no Diesel	0,87
CO <sub>2</sub> /C	3,67
CO <sub>2</sub> Fator de Eficiência	99%
g de CO <sub>2</sub> /g de diesel	3,16

Fonte: Autor.

Tabela 16 - Fator de Emissão de CO<sub>2</sub> do Gás Natural.

GAS	
Fator de Emissão de Carbono	17 Mg/TJ
	4,91E-04 tons/l

Fonte: Autor.

#### 4.4 Mitigação Ambiental

Baesso *et al.* (2010) cita que no balanço global de carbono na atmosfera da Terra cerca de 8 bilhões de toneladas de carbono são emitidas anualmente na forma de CO<sub>2</sub> pela queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra. Somente 3,2 bilhões permanecem na atmosfera, provocando o aumento do efeito estufa, o restante é reabsorvido pelos oceanos e pela biota terrestre. É cada vez maior o interesse pela fixação de carbono em florestas plantadas, principalmente devido as suas elevadas taxas de crescimento e consequente capacidade de remover dióxido de carbono da atmosfera. A remoção do dióxido de carbono da atmosfera ocorre por meio da fotossíntese nos vegetais e sua liberação no processo de respiração, sendo parte deste carbono armazenado nos diversos componentes das plantas. O eucalipto oferece diversas vantagens em comparação a outras espécies florestais, inclusive as nativas, apresentando grande relevância no cenário atual, em que se busca o desenvolvimento sustentável, pois a necessidade de materiais oriundos da madeira é questão estratégica para o desenvolvimento do país, sendo as florestas de eucalipto uma excelente solução como fonte deste tipo de matéria prima nos dias atuais (BAESSO *et al.*, 2010). O pico de crescimento anual pode ser de até 95 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> (ALMEIDA *et al.*, 2007).

O Brasil assumiu, em 2009, um compromisso voluntário de reduzir suas emissões de gases de efeito estufa. Dentre os planos propostos para reduzir as emissões de GEE brasileiras está o Plano para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC). Deste modo, a geração do balanço de GEE nesses sistemas é importante no contexto das mudanças climáticas e pode contribuir para o refinamento das estimativas em relação ao potencial de mitigação desses sistemas, auxiliando assim na promoção de políticas públicas e ações dentro do Plano ABC (ROCHA *et al.*, 2017).

Diversos métodos descrevem a absorção de carbono pela planta como o 3-PG (Physiological Principles for Predicting Growth) que consiste em basicamente de cinco submodelos: produção de biomassa; balanço de água no solo; alocação de biomassa entre folhas, raízes e lenho (incluindo galhos e cascas); mortalidade de árvores; e módulo para converter biomassa de tronco em variáveis de interesse para

o manejo florestal (BAESSO *et al.*, 2010; LANDSBERG; WARING, 1997). No presente estudo analisaremos apenas a produção de biomassa.

É importante ressaltar que não serão considerados os consumos e emissões de carbono no processo de plantio e operação da floresta, este estudo visa apenas apontar uma alternativa viável de compensação ambiental dos processos de construção/manutenção rodoviária.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, possui um *software* que é o resultado de quase três décadas de pesquisa científica e foi construído para atender à forte demanda de produtores florestais, cientes de que florestas conduzidas sem base científica seguramente levam a um grande desperdício de recursos econômicos e ambientais. O *software* é denominado SisEucalipto (EMBRAPA, 2018) e o programa permite iterações considerando a condição de clima, solo, manejo de floresta, prognoses de produção presente e futura e efetua análises econômicas.

Com a finalidade de aproximar o estudo de caso com a realidade local, foi realizada uma visita a uma floresta de reflorestamento cujo objetivo é a produção de biomassa, localizada na altura do km 140 da rodovia BR 262, próximo ao ponto estudado. Sua localização está representada na Figura 7 e a floresta possui as seguintes características:

- Índice de Sítio = 23 metros de altura;
- Número de árvores plantadas por hectare - Densidade e percentual de plantas vivas = 1,111 árvores por hectare, com Índice de 95% de sobrevivência;
- Idade em que as condições são conhecidas = A partir de 2 anos de idade, (menos Índice de sitio esse é o atual);
- Área basal= 22 A 24;
- Idade inicial e final = 2 anos - 10 anos, no caso do estudo, 30 anos;
- Idade = É realizado desbastes em florestas que serão conduzidas para serraria, nesse caso ocorre desbaste de 50% aos 7 anos, em floresta para celulose, mdf (Medium Density Fiberboard);
- Tipo = seletivo por fenótipo;

- Árvore remanescente= 50%; e,
- Área Basal remanescente = Igual a basal inicial.

Figura 7 - Localização e Área da Floresta Estudada



Fonte: Google Earth.

O *software* permite calcular a biomassa e o carbono de compartimento das árvores em função de equações que o usuário venha a introduzir.

De acordo com o manual do *software*, o crescimento das árvores é afetado diretamente pelas características locais ou sítio (solo e clima). Sendo assim, o índice de sítio é a medida potencial da produtividade do sitio, ou seja, a capacidade de uma área em possibilitar o crescimento de determinada espécie, por isso é fundamental conhecer o local a ser reflorestado com a finalidade de mitigação ambiental e assim determinar seu real potencial ambiental e para tal foram consideradas as seguintes equações:

A Equação 8 de sitio, conforme o *software* Embrapa (IS 7 anos):

$$S * \exp(-2.72 * (A^{\wedge} - 0.51 - 7^{\wedge} - 0.51)) \quad \text{Eq. (8)}$$

Sendo:

A = idade;

S = sítio.

Equação 9 é a de volume:

$$7.854E - 5 * D^2 * 0.39 * H \quad \text{Eq. (9)}$$

Sendo:

D = diâmetro;

H = altura; e

A = idade.

Equação 10 é a de sortimento.

$$D * (1.2812 * X + 1.6088 * X^2 - 4.3796 * X^3 + 2.5469 * X^4) \quad \text{Eq. (10)}$$

Sendo:

D= Diâmetro; e

X = altura

Integral da Equação 10 de sortimento elevado ao quadrado está representado Equação 11.

$$0.5472 * X^3 + 1.0306 * X^4 - 1.7268 * X^5 - 1.2609 * X^6 + 3.9108 * X^7 - 2.7886 * X^8 + 0.7207 * X^9 \quad \text{Eq. (11)}$$

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Quantificação Da Emissão De CO<sub>2</sub>

Os segmentos estão relacionados na Tabela 17, indicando início e final de cada trecho com seu respectivo comprimento sempre utilizando as unidades métricas.

É importante citar que o asfalto tipo WMA tem um equivalente de 0,89 em relação ao asfalto CBUQ usualmente utilizado, ou seja, necessita de 11% mais material para que haja equivalência entre as camadas (KHOSRAVIFAR; GOULIAS; SCHWARTZ, 2012).

As dimensões da primeira seção esta descritas na Tabela 18 e estão representados na Figura 8.

Tabela 17 - Relação dos Segmentos Estudados.

local de início	local de fim	km inicial	km final	extensão	superfície federal
div sp/ms (início travessia rio paraná)	fim travessia rio paraná	-	1,50	1,50	pav
fim travessia rio paraná	trevo da cesp	1,50	4,20	2,70	pav
trevo da cesp	início da duplicação	4,20	5,00	0,80	pav
início da duplicação	entr br-158(a) (três lagoas)	5,00	5,70	0,70	dup
entr br-158(a) (três lagoas)	fim pista dupla	5,70	9,10	3,40	dup
fim pista dupla	entr br-158(b) (p/brasilândia)	9,10	13,40	4,30	pav
entr br-158(b) (p/brasilândia)	entr ms-459 (p/arapuá)	13,40	49,40	36,00	pav
entr ms-459 (p/arapuá)	entr ms-453 (p/garcias)	49,40	69,10	19,70	pav
entr ms-453 (p/garcias)	entr ms-124/377 (p/inocência)	69,10	139,60	70,50	pav
entr ms-124/377 (p/inocência)	início duplicação (água clara) *trecho urbano*	139,60	143,30	3,70	pav
início duplicação (água clara)	final pista dupla *trecho urbano*	143,30	144,20	0,90	dup
final pista dupla	entr ms-338 (p/santa rita do pardo)	144,20	191,10	46,90	pav

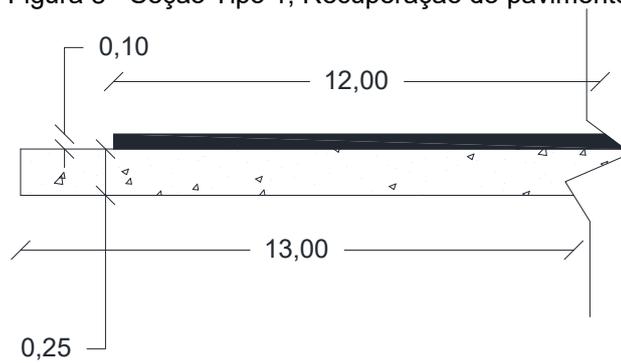
Fonte: Autor.

Tabela 18 - Definições das Camadas em unidades métricas.

Camada --> m	Largura	Comprimento	Espessura	Volume
Camada de Rolamento	12,000	1.000,000	0,050	600,000
Camada de Enchimento	12,000	1.000,000	0,050	600,000
Camada de Base	13,000	1.000,000	0,250	52.962,977

Fonte: Autor.

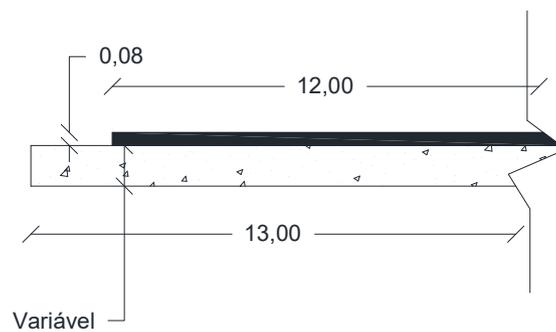
Figura 8 - Seção Tipo 1, Recuperação do pavimento.



Fonte: Autor.

A seção do pavimento existente utilizado nas análises conforme Figura 9.

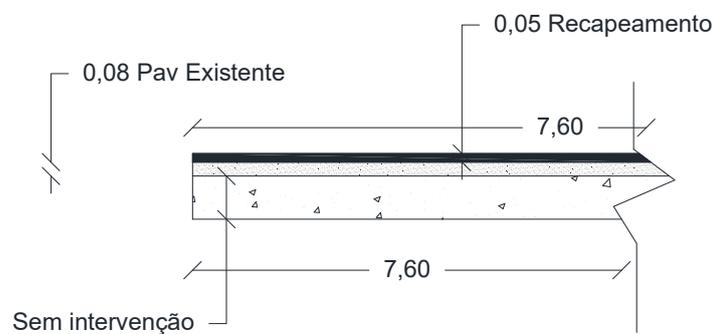
Figura 9 - Seção do Pavimento Existente.



Fonte: Autor.

Para os perímetros urbanos, foi considerada a seção tipo conforme Figura 10 com suas unidades em metros.

Figura 10 - Seção Tipo Perímetro Urbano.



Fonte: Autor.

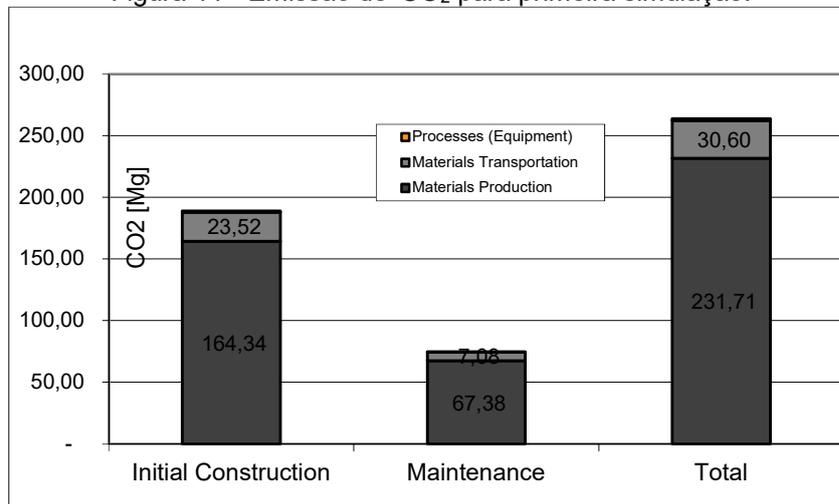
A partir destas informações, o PaLATE retornou os seguintes consumos e emissões expostos na Tabela 19 e a representação gráfica dos resultados estão nas Figuras 11 e 12 para uma simulação de solução no km 126 da rodovia em estudo, e após análise dos resultados de todas as simulações foi replicada a técnica mais eficiente ambientalmente para todo o trecho da obra, com o intuito de aproximar o impacto ambiental total de uma obra de restauração.

Tabela 19 - Resultado da primeira simulação

Etapa	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP
Produção dos Materiais	3.672.912,54	231,71
Transporte dos Materiais	409.341,23	30,60
Processo Construtivo	19.190,17	1,44
Total Geral	4.101.443,94	263,76

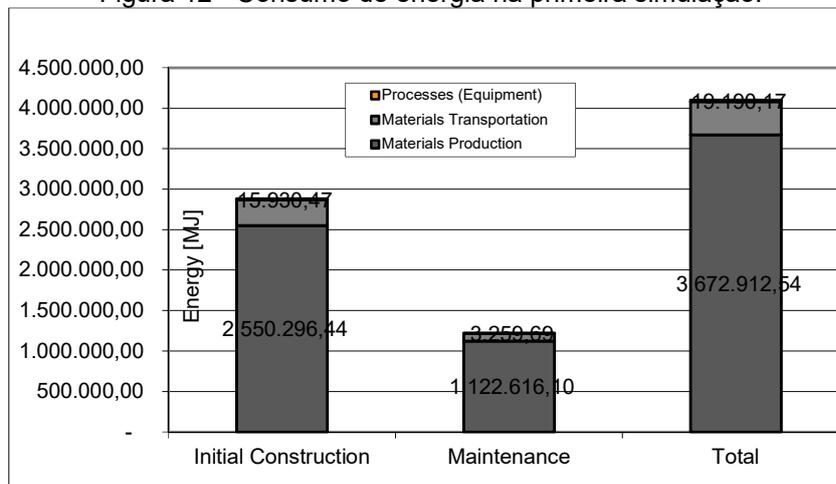
Fonte: Autor.

Figura 11 - Emissão de CO<sub>2</sub> para primeira simulação.



Fonte: Autor.

Figura 12 - Consumo de energia na primeira simulação.



Fonte: Autor.

Para a segunda proposta construtiva, apenas irá substituir o combustível no processo de aquecimento da mistura asfáltica para gás natural, mantendo os demais critérios e seu resultado está na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultado da segunda simulação

Etapa	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP
Produção dos Materiais	3.856.328,46	208,86
Transporte dos Materiais	409.341,23	30,60
Processo Construtivo	19.190,17	1,44
Total Geral	4.284.859,86	240,90

Fonte: Autor.

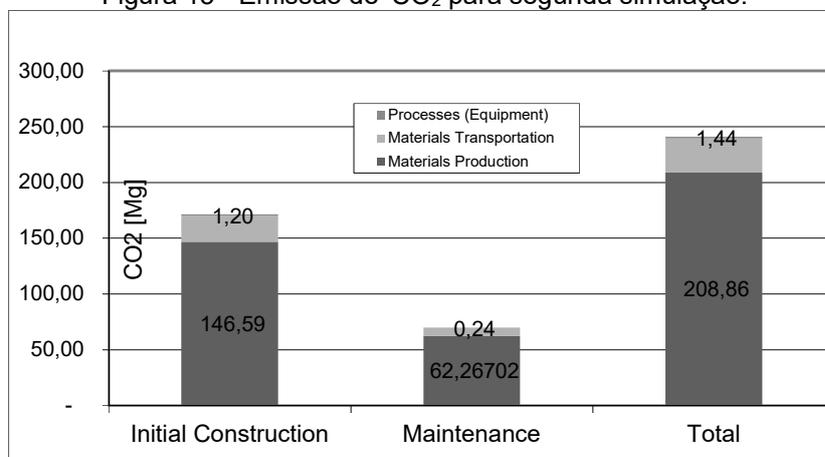
Apenas com a substituição do combustível, houve um ganho de 8,67% de redução de CO<sub>2</sub> considerando a produção total dos materiais (extração de agregado virgem, produção do betume e produção da mistura asfáltica). Ao analisar-se apenas a produção da mistura, houve redução de 65% na emissão de CO<sub>2</sub>, mesmo utilizando mais energia devido ao mais baixo poder calorífico do gás em relação ao óleo e após a definição destes critérios, a planilha obteve os seguintes resultados conforme Tabela 21. A planilha apresentou os seguintes gráficos para CBUQ com gás natural conforme Figuras 13 e 14.

Tabela 21 - Emissão de CO<sub>2</sub> por combustível.

Etapa Produtiva CBUQ	CO <sub>2</sub> Kg
Produção da CBUQ (GAS)	12.533,27
Produção da CBUQ (Óleo)	35.389,51

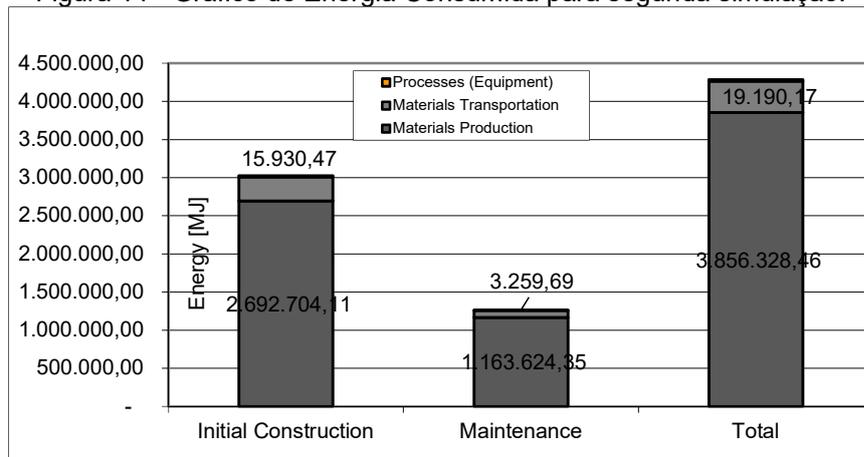
Fonte: Autor.

Figura 13 - Emissão de CO<sub>2</sub> para segunda simulação.



Fonte: Autor.

Figura 14 - Gráfico de Energia Consumida para segunda simulação.



Fonte: Autor.

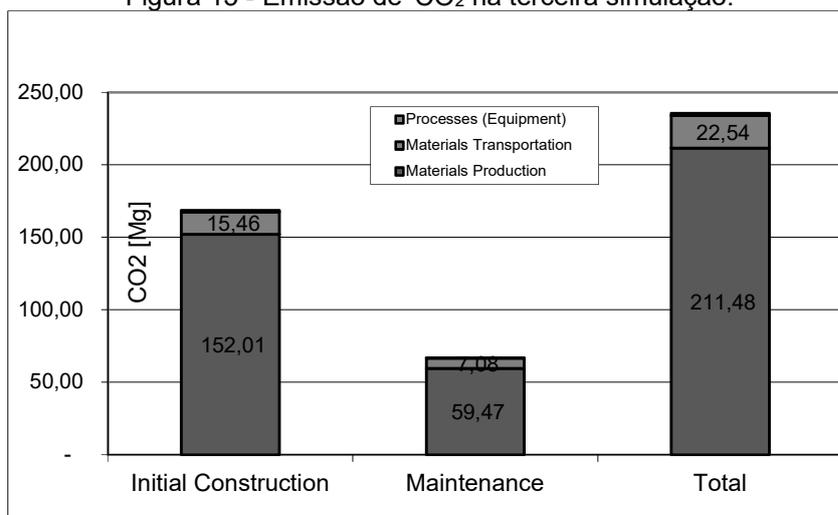
Uma terceira simulação propôs a camada de rolamento com reaproveitamento do material fresado em sua composição até o limite de 40%, pois os ganhos ambientais ao se reutilizar os materiais são mais relevantes do que melhorar o desempenho dos equipamentos, além disso a utilização de material reciclado na base com adição de espuma de asfalto (reciclagem de base) pode reduzir em até 60% a emissão de gases de efeito estufa. (LIU; CUI; SCHWARTZ, 2014). Nesta simulação considerou-se óleo como combustível no aquecimento da mistura asfáltica e os resultados foram os da Tabela 22 apresentados nas Figuras 15 e 16.

Tabela 22 - Resultados da terceira simulação

Etapa	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP
Produção dos Materiais	3.483.476,04	211,48
Transporte dos Materiais	301.466,90	22,54
Processo Construtivo	19.190,17	1,44
Total Geral	3.804.133,11	235,46

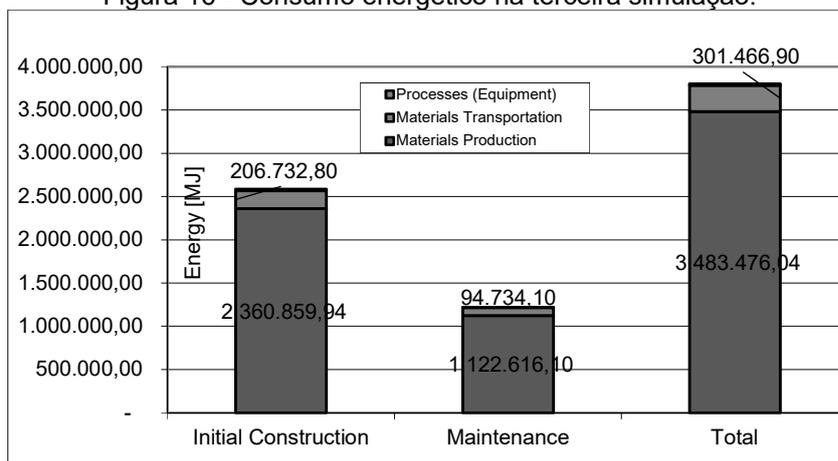
Fonte: Autor.

Figura 15 - Emissão de CO<sub>2</sub> na terceira simulação.



Fonte: Autor.

Figura 16 - Consumo energético na terceira simulação.



Fonte: Autor.

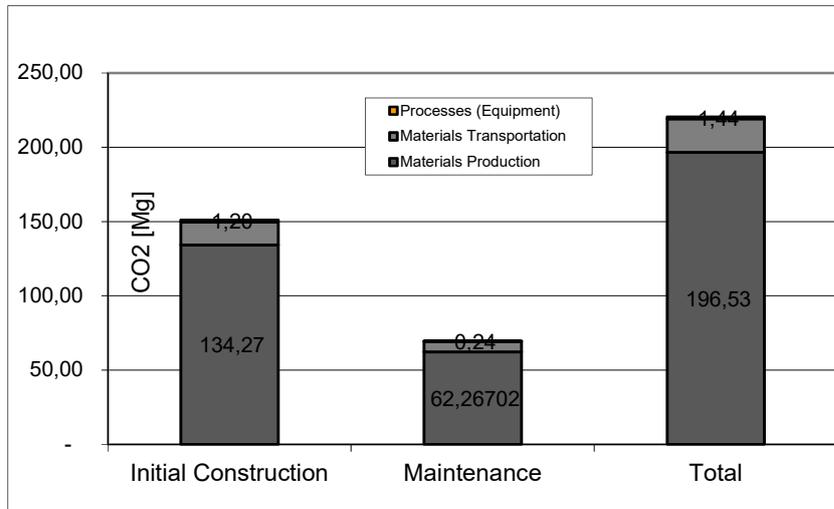
Utilizando o gás natural como combustível de aquecimento da mistura asfáltica com os mesmos critérios da terceira simulação, obteve-se os resultados conforme Tabela 23 e Figuras 17 e 18.

Tabela 23 - Resultados da quarta simulação

Etapa	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP
Produção dos Materiais	3.666.891,96	196,53
Transporte dos Materiais	301.466,90	22,54
Processo Construtivo	19.190,17	1,44
Total Geral	3.987.549,03	220,51

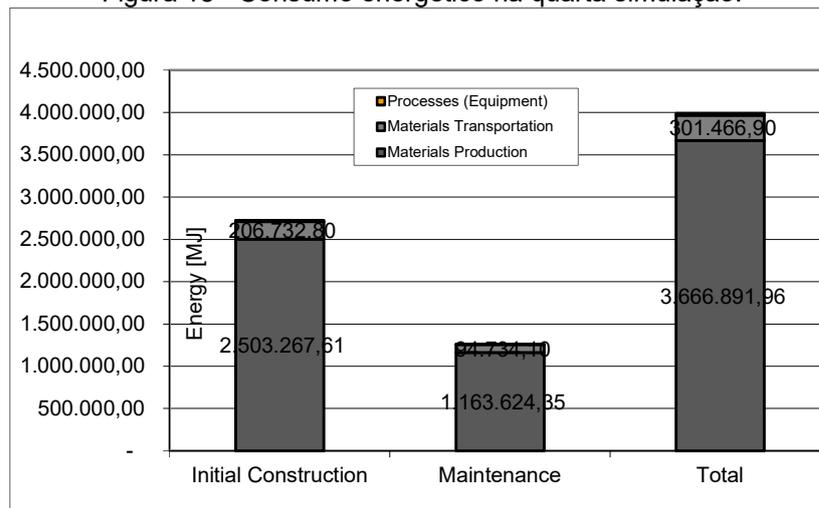
Fonte: Autor.

Figura 17 - Emissão de CO<sub>2</sub> na quarta simulação.



Fonte: Autor.

Figura 18 - Consumo energético na quarta simulação.



Fonte: Autor.

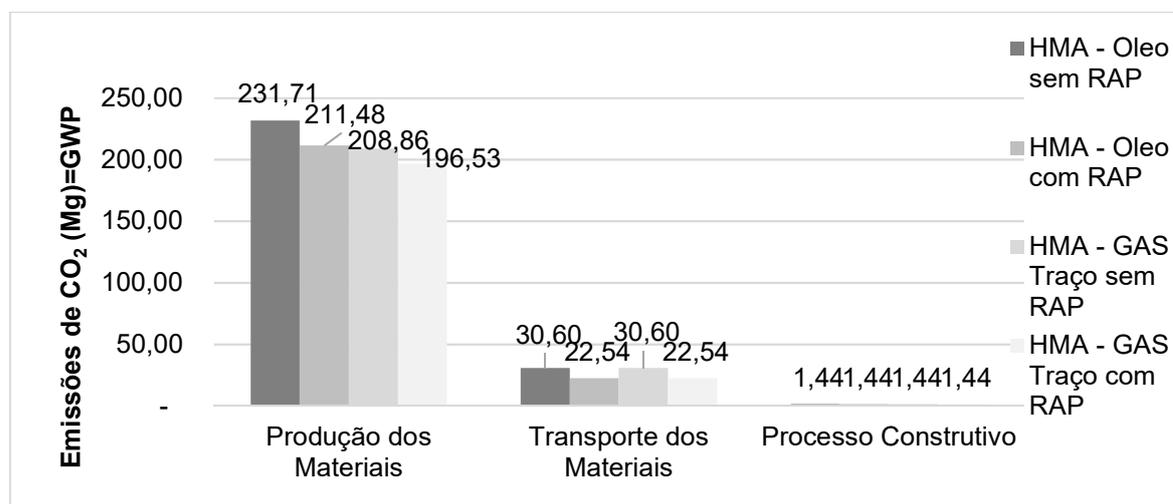
Ao final das simulações, obtivemos os seguintes valores na ferramenta PaLATE resumidos na Tabela 24 e com sua representação gráfica na Figura 19.

Tabela 24 - Resultado das Simulações na Etapa de Produção dos Materiais

Produto	CBUQ - Óleo sem RAP		CBUQ - Óleo com RAP		CBUQ - GLP Traço sem RAP		CBUQ - GLP Traço com RAP	
Etapa	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP
Produção dos Materiais	3.672.912,54	231,71	3.483.476,04	211,48	3.856.328,46	208,86	3.666.891,96	196,53
Transporte dos Materiais	409.341,23	30,60	301.466,90	22,54	409.341,23	30,60	301.466,90	22,54
Processo Construtivo	19.190,17	1,44	19.190,17	1,44	19.190,17	1,44	19.190,17	1,44
Total Geral	4.101.443,94	263,76	3.804.133,11	235,46	4.284.859,86	240,90	3.987.549,03	220,51

Fonte: Autor.

Figura 19 - Resultado das Simulações na Etapa de Produção dos Materiais.



Fonte: Autor.

Considerando que o CBUQ com utilização de RAP e aquecimento a gás se mostrou a alternativa mais viável ambientalmente, foi elaborada uma simulação aplicando-se nos segmentos conforme a Tabela 17 e suas respectivas distâncias de transportes a solução adotada para definir qual a emissão total do poluente CO<sub>2</sub> da obra. Tal resultado está apresentado na Tabela 25, indicando a quantidade total do poluente CO<sub>2</sub> na recuperação do segmento em análise.

Tabela 25 - Quantificação total de Consumo Energético e Emissão de CO<sub>2</sub>

Produto	CBUQ - GAS Traço com RAP	
Etapa	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP
Recuperação Total da Via	700.879.762,92	37.803,05

Fonte: Autor.

Uma análise do consumo energético e das emissões de CO<sub>2</sub> apenas da etapa de produção da mistura asfáltica está representado na Tabela 26 e aponta o cálculo considerando todas as simulações já propostas.

Tabela 26 - Gasto Energético e Emissão de CO<sub>2</sub> da Produção da Mistura Asfáltica

Produto	CBUQ - Óleo Traço sem RAP		CBUQ - Óleo Traço com RAP		CBUQ - GLP Traço sem RAP		CBUQ - GLP Traço com RAP	
	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP
Mistura Asfáltica	3.217.818,82	199,60	3.028.382,32	179,37	3.401.234,74	176,75	3.211.798,24	164,42

Fonte: Autor.

Observa-se que o consumo de energia e a emissão de poluentes desta etapa construtiva para os casos estudados representam aproximadamente 86% de todas as emissões e consumos energéticos do processo, alinhado com a pesquisa bibliográfica realizada no trabalho. A Tabela 27 representa os resultados obtidos apenas no processo construtivo da recuperação da base e contemplam apenas um quilometro da solução proposta conforme descrito anteriormente.

Tabela 27 - Gasto Energético e Emissão de CO<sub>2</sub> na produção da Base

Etapa Construtiva	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP
Base	455.093,71	32,11

Fonte: Autor.

O PaLATE não faz considerações a respeito da temperatura de aquecimento da mistura, mas oferece recursos e considerações a respeito da energia desprendida em cada método construtivo. Importantes autores consideram esta a mais rápida e prática solução de redução de gases causadores de efeito estufa devido à baixa alteração estrutural do pavimento, pois há apenas considerações a respeito do coeficiente estrutural da camada de rolamento.

O estudo de ciclo de vida mostrou-se coerente com a pesquisa bibliográfica realizada, corroborando o encontrado no estudo mostrando que de fato há redução nas emissões de poluentes apenas reconsiderando-se os métodos utilizados pois desde 2009 o critério de avaliação de ciclo de vida tem sido adotado com mais rigor. (LIU; CUI; SCHWARTZ, 2014).

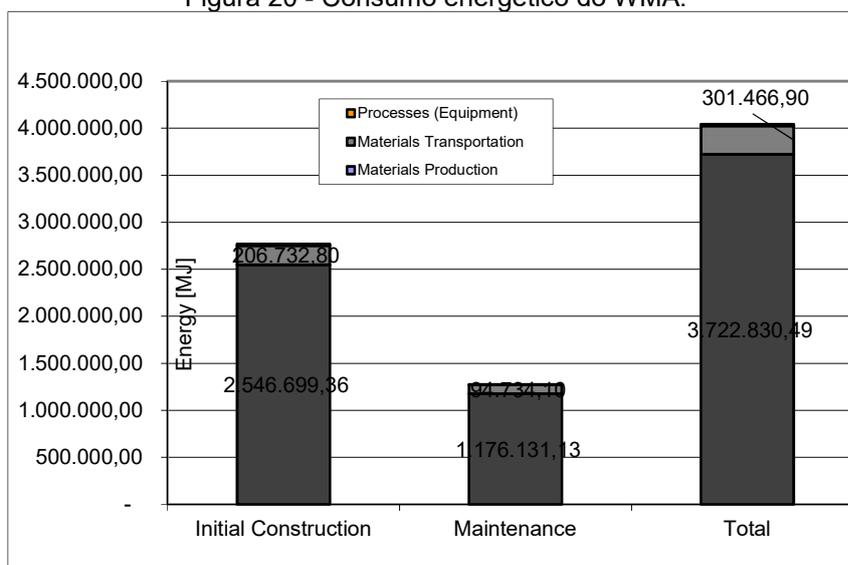
Para cada produto comercial encontrado, utiliza-se uma determinada quantidade de energia na sua produção, mas para fins didáticos e experimentais foi realizada simulação no PaLATE utilizando-se 8,8% menos poder calorífico no aquecimento da mistura (KUCUKVAR *et al.*, 2014). Assim, o PaLATE considerou 265.322,40BTUs no aquecimento de uma tonelada de mistura asfáltica morna, algo próximo do que considera Peng *et al* (2015). Como resultado obteve-se os dados apresentados na Tabela 28 e representados nas Figuras 20 e 21, indicando o consumo energético deste método e sua respectiva emissão do poluente CO<sub>2</sub>.

Tabela 28 - Simulação WMA.

Etapa	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP
Produção dos Materiais	3.722.830,49	195,43
Transporte dos Materiais	301.466,90	22,54
Processo Construtivo	19.190,17	1,44
Total Geral	4.043.487,56	219,41

Fonte: Autor.

Figura 20 - Consumo energético do WMA.



Fonte: Autor.

Há de se considerar que o aquecimento da mistura asfáltica no estudo de caso em questão teve um peso reduzido na emissão total, devido as grandes distâncias de transportes, mas observa-se também que ao analisar-se apenas a construção inicial a redução foi de apenas 0,64%, de fato irrelevante em termos de emissão de CO<sub>2</sub> quando se utiliza gás como combustível.

Figura 21 - Emissão de CO<sub>2</sub> na WMA.



Fonte: Autor.

Não existe apenas um parâmetro a ser controlado e verificado quando o CBUQ está sendo produzido. A fórmula do asfalto tipo desta mistura, o combustível utilizado, vazão do queimador, consumo de combustível, pressão negativa do tambor, temperatura do ar, umidade de agregados, temperatura de asfalto e taxa de produção devem ser considerados nas avaliações de desempenho. Globalmente, as usinas movidas a gás natural emitem metade da quantidade de CO<sub>2</sub>, nove vezes menos NO<sub>x</sub> e dezoito vezes menos CO que as plantas com óleo combustível (PARANHOS; PETTER, 2013).

Para a última simulação, onde utiliza-se WMA com o gás natural como combustível, a planilha apresentou os seguintes dados expostos na Tabela 29 a respeito apenas da produção do asfalto a quente:

Tabela 29 - Comparação entre WMA a Gás e CBUQ a óleo

Etapa	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP
Produção do WMA com GAS	11.430
Produção de CBUQ com Óleo	27.483

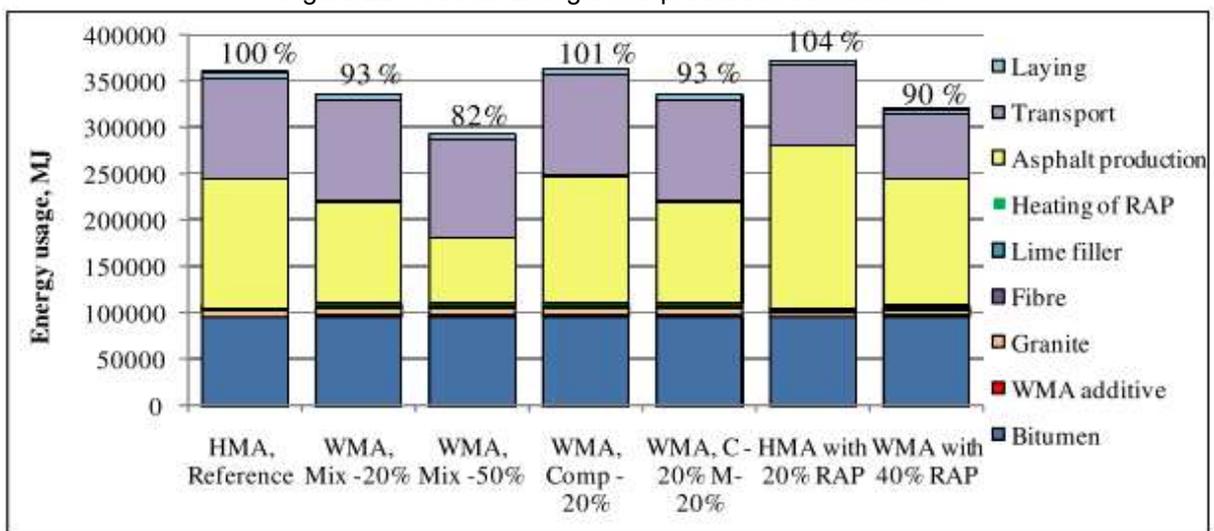
Fonte: Autor.

O resultado corrobora o apontado pelo autor Paranhos (2013), e mostra que há ganhos ambientais ao utilizar-se WMA aquecido a gás em detrimento ao CBUQ aquecido a óleo, entretanto deve-se considerar que nesta última comparação o CBUQ não utilizou o RAP em sua composição, mas tal resultado apenas se mostra

viável ao analisar-se exclusivamente o processo de produção da mistura asfáltica com equivalência de volumes.

As análises mostraram que é possível obter-se melhores desempenhos ambientais com a utilização das técnicas apontadas, os ganhos ao se analisar o ciclo de vida da obra são relevantes, e ao analisar apenas etapas chaves os desempenhos ambientais das diferentes técnicas mostraram reduções importantes na emissão dos poluentes. O gráfico apresentado por Zaumanis *et al*, (2011), confirma o encontrado no estudo, porém os autores utilizaram outra técnica de avaliação de ciclo de vida conforme a Figura 22.

Figura 22 - Uso de Energia nos processos construtivos.



Fonte: (ZAUMANIS; JANSEN; SMIRNOVS, 2011).

Em relação aos meios com os quais as usinas de CBUQ podem ser projetadas e operadas as melhores maneiras são a fabricação de plantas de produção móveis e pequenas, em oposição a usinas grandes estacionárias, e o uso de queimadores com gás natural em vez de óleo combustível é ambientalmente mais amigável em todos os casos. A produção de plantas de CBUQ, objetivando uma produção mais limpa, significa operar usinas de asfalto considerando sempre o horizonte de longo prazo. Isso abrange a realização de análises diárias, semanais e anuais. Portanto, é necessário produzir com alta taxa de produção e baixa temperatura de betume e manter uma produção regular, a fim de evitar picos de produção e arranques e paragens desnecessários. Também é interessante aumentar a cultura de estoques aquecidos (PARANHOS; PETTER, 2013). Embora, o uso de RAP possa exigir

energia adicional no processo, ele economiza a quantidade de agregados virgens utilizada, reduz os gases de efeito estufa, resolve o problema de resíduo comum a utilização de RAP e também reduz o preço do asfalto. Da mesma forma, diferentes tecnologias para a produção de aditivos WMA podem ser o motivo das discussões, já que algumas delas usam resíduos de outros processos de produção, enquanto outras requerem produção especial, causando mais poluição. No entanto, uma coleta e análise de dados são necessárias para verificar essa declaração (ZAUMANIS; JANSEN; SMIRNOVS, 2011).

No caso do projeto em estudo, cuja seção tipo prevê uma plataforma de 7,0m de largura para faixa de rolamento, a emissão total apenas de CO<sub>2</sub> pode chegar a 2,1 T por km.

## 5.2 Sequestro Do Co<sub>2</sub> Emitido Pela Produção Da Mistura Asfáltica

Assim, obtive-se os seguintes resultados de absorção de CO<sub>2</sub> em toneladas por hectare de *eucalyptus grandis/urograndis* utilizando o software SiSEucalipto conforme Tabela 30.

Tabela 30 - Desenvolvimento da floresta

Idade	Alt. Dominante	Árvores/Há	Diâmetro Médio	Alt. Média	Área Basal	Volume Total	I.M.A.	tCO <sub>2</sub>
10,00	27,20	1.094,00	18,20	22,00	28,50	244,60	24,50	230,30
20,00	34,90	997,00	21,40	27,90	35,80	390,50	19,50	367,70
30,00	39,00	904,00	22,70	30,80	36,60	440,40	14,70	414,70

Fonte: Autor.

Conclui-se assim que uma floresta com as características descritas absorve no período de 10 anos 230,30 toneladas de CO<sub>2</sub> e 414,70 no período de 30 anos, que é o tempo mínimo de floresta quando se considera o sequestro de carbono. A Tabela 31 representa a floresta necessária para compensação de 1 km de via no período de 10 anos.

Tabela 31 - Compensação de CO<sub>2</sub> x Floresta

Produto	CBUQ - Óleo Traço sem RAP		CBUQ - Óleo Traço com RAP		CBUQ - GAS Traço sem RAP		CBUQ - GAS Traço com RAP	
	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP
Produção dos Materiais	3.672.912,54	231,71	3.483.476,04	211,48	3.856.328,46	208,86	3.666.891,96	196,53
Transporte dos Materiais	409.341,23	30,60	301.466,90	22,54	409.341,23	30,60	301.466,90	22,54
Processo Construtivo	19.190,17	1,44	19.190,17	1,44	19.190,17	1,44	19.190,17	1,44
Total Geral	4.101.443,94	263,76	3.804.133,11	235,46	4.284.859,86	240,90	3.987.549,03	220,51
Área de floresta em ha		1,1453		1,0224		1,0460		0,9575

Fonte: Autor.

Conclui-se que para mitigação do poluente CO<sub>2</sub> na recuperação total do segmento em análise se faz necessário uma área de floresta de 91,16há de *eucalyptus grandis/urograndis* com tempo mínimo de 30 anos de cultura conforme Tabela 32.

Tabela 32 - Quantificação total de Área Plantada

Produto	HMA - GAS Traço com RAP – Toda a extensão	
Etapa	Energia (MJ)	CO <sub>2</sub> (Mg) = GWP
Consumo Total	700.879.762,92	37.803,05
Área total de floresta em há		91,1576

Fonte: Autor.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do referencial teórico mostrou que a adoção de soluções construtivas amigáveis tangentes ao processo de mistura e aquecimento do asfalto é uma maneira rápida e pouco traumática de se reduzir o impacto ambiental das obras de construção em infraestrutura. As utilizações destas técnicas mostram-se como boas alternativas para tal, entretanto, técnicas construtivas equivocadas para determinado projeto podem desprender grandes quantidades de energia e baixo ganho ambiental e cada avaliação deve ser tratada de maneira única, para cada projeto, e não se deve aplicar um mesmo resultado para diferentes situações.

A avaliação do ciclo de vida considerando a idade do projeto, métodos determinados, analisados e quantificados mostrou-se uma ferramenta fundamental no dimensionamento do impacto ambiental da manutenção de rodovias e os resultados obtidos mostraram-se coerentes com a bibliográfica estudada. De fato, a etapa mais poluente é a produção da mistura asfáltica e propor meios de minimizar a emissão de poluentes deve ser um dos objetivos durante a elaboração do programa de construção, restauração e manutenção da rodovia.

Quando o óleo pesado, que é o combustível tradicional do aquecimento do CBUQ é substituído por gás natural há ganhos ambientais. Tal técnica é de fácil aplicação pois envolve poucas alterações nos queimadores das usinas de asfalto tradicionais e seu impacto na produção da mistura em termos de desempenho é nulo. Tal solução é uma alternativa que pode ser adotada pelo poder público em seus contratos. O custo dessa substituição pode ser objeto de estudos futuros, assim sendo, a maneira mais eficiente de se minimizar os prejuízos ambientais nas obras de infraestrutura rodoviária é a utilização de gás natural como combustível e reaproveitamento de materiais durante as etapas construtivas, tratando-se de manutenção do pavimento já existente.

A diminuição na temperatura de aquecimento ainda não está consagrada na literatura, e devido ao seu desempenho mais baixo do que as misturas aquecidas a temperaturas mais altas o consumo de material é maior, desequilibrando os ganhos ambientais devido a uma maior extração de materiais, seja ele reaproveitado ou não.

O trabalho mostrou que há grande quantidade de emissão de poluentes no projeto tipo proposto, por isso técnicas de mitigação devem ser escolhidas de modo a atender a grande demanda; a silvicultura, por sequestrar grandes quantidades de CO<sub>2</sub> mostrou-se uma alternativa viável.

Os cálculos mostraram de maneira teórica o potencial ambiental das soluções sem impactar o projeto inicial da solução, mostrando que apenas melhorando aspectos do projeto as soluções se tornam mais amigáveis ambientalmente e sustentáveis.

Como sugestão para trabalhos futuros, considerar a utilização de reflorestamento natural pode ser ainda uma alternativa viável tratando-se de sequestro de carbono. Deve-se considerar também o destino final da biomassa da floresta no projeto para que o CO<sub>2</sub> não volte para a atmosfera.

A pesquisa não analisou os custos para viabilizar os projetos de reflorestamento ou cultivo de silviculturas e não considerou as emissões no manejo destas culturas a montante, tal equação pode ter um resultado impactante no dimensionamento das áreas.

Não foi elaborada uma planilha considerando os fatores financeiros das técnicas propostas; uma análise mais aprofundada das comparações entre as soluções é aplicável visando a popularização das técnicas mais amigáveis, de modo a sensibilizar o poder público e os empresários do setor de infraestrutura a adotarem tais medidas.

Entender os impactos ambientais causados por este setor da engenharia é um importante passo na busca por métodos mais eficientes, mas aprofundar o conhecimento na mitigação destes impactos é fundamental para que o objetivo de propor soluções técnicas coerentes seja atingido, mensurar é um passo importante, mas apenas isso não é suficiente para atingirmos soluções concretas visando a compensação ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ALLWOOD, J. M.; ASHBY, M, F; GUTOWSKI, T, G.; WORREL, ERNST. Material efficiency: A white paper. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 3, p. 362-381, 2011.
- ALMEIDA, A. *et al.* Crescimento e balanço hídrico de plantios híbridos de Eucalyptus grandis no Brasil durante rotação para produção de celulose. **Ecologia e Gestão Florestal**, v. 251, n 1-2, p. 10-21, 2007.
- ANTHONISSEN, J.; BRAET, J.; VAN DEN BERGH, W.; Life cycle assessment of bituminous pavements produced at various temperatures in the Belgium context. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 41, p. 306-317, 2015.
- AQUINO, C. S.; VALLADARES, G. S. V. S. Geografia, Geotecnologias e Planejamento Ambiental. **Geografia (Londrina)**, v. 22, n. 1, p. 117-138, 2013.
- AURANGZEB, Q. *et al.* Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 83, p. 77-86, 2014.
- AZARIJAFARI, H.; YAHIA, A.; BEN AMOR, M. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2187-2197, 2016.
- BAESSO., R. C. E. *et al.* Balanço de Carbono em Florestas de Eucalipto. Em: XVI **Congresso Brasileiro de Meteorologia**. 2010. Belém, Brasil. Disponível em < [https://www.researchgate.net/publication/320383137\\_Balanco\\_de\\_carbono\\_em\\_floresta\\_de\\_eucalipto](https://www.researchgate.net/publication/320383137_Balanco_de_carbono_em_floresta_de_eucalipto) > . Acessado em 23 de outubro de 2018.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. 1ª ed. São Paulo: Almeida, 2011.
- BRASIL. Lei Nº 10.233, de 5 de junho De 2001. Dispõe sobre a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre, cria o Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte, a Agência Nacional de Transportes Terrestres, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários e o Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, e dá outras providências. Diário Oficial da Republica Federal do Brasil, Brasília, 6 de junho de 2001. Disponível em <

[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/LEIS\\_2001/L10233.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/LEIS_2001/L10233.htm)> . Acessado em 23 de outubro de 2018.

BRASIL. Lei Nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Diário Oficial da Republica Federal do Brasil, Brasília, 24 de setembro de 1997. Disponível em < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9503.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9503.htm)> . Acessado em 23 de outubro de 2018.

BRASIL. Decreto Legislativo Nº 333. Aprova o texto do Acordo-Quadro sobre Meio Ambiente, assinado em Assunção, no âmbito do Mercado Comum do Sul - MERCOSUL, em 22 de junho de 2001. Brasília, 24 de julho de 2003. Disponível em < <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decleg/2003/decretolegislativo-333-24-julho-2003-494160-acordo-quadro-1-pl.html>> . Acessado em 23 de outubro de 2018

BLANKENDAAL, T.; SCHUUR, P.; VOORDIJK, H. Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: A scenario approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 27-36, 2014.

CHAN, S.; LANE, B.; KAZMIEROWSKI, T.; LEE, W. Pavement Preservation – A Solution For Sustainability. **Transportation Research Board**. v. 2235, issue 1, 2011.

CARLSON, D. J., GREENBERG, E., KANNINEN, M. Street Design: Part 2 – Sustainable Streets. **Public Roads**, v. 74, p 8-15, 2011.

EMBRAPA. **SisEucalipto. Versão 1.0**, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018. Disponível em <http://www.cnpf.embrapa.br/software/conteudo.php>. Acessado em 24 de outubro de 2018.

LIU, J., ZHAO. S., PENG, L., Environmental Sustainability in Transportation Infrastructure, 2015. **Conference Paper**. American Society of Civil Engineers (ASCE). p.200-212, 2015.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTANTION WA, FEDERAL. Federal Highway Administration. 2017. Disponível em <https://www.fhwa.dot.gov/map21/>. Acessado em 23 de novembro de 2018.

CASS, D.; MUKHERJEE, A. Calculation of greenhouse gas emissions for highway construction operations by using a hybrid life-cycle assessment approach: case study for pavement operations. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 137, n. 11, p. 1015-1025, 2011.

DAINESE, R. C. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao estudo temporal do uso da terra e na comparação entre classificação não supervisionada e análise visual**. 2001. 186 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, 2001. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/90651>>.

DINIS-ALMEIDA, M.; AFONSO, M. L. Warm Mix Recycled Asphalt - A sustainable solution. **Journal of Cleaner Production**, v. 107, p. 310-316, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. PUBLICAÇÃO IPR - 710. **Manual de Conservação Rodoviária**. Rio de Janeiro, p. 564. 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. PUBLICAÇÃO IPR - 719. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, p. 274. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. PUBLICAÇÃO IPR - 723. **Manual de Estudos de Tráfego**. Rio de Janeiro, p. 384. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. PUBLICAÇÃO IPR - 730. **Manual Para Atividades Ambientais Rodoviárias**, p. 437. 2006.

DNIT GEO. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018. Disponível em < <https://www.dnit.gov.br/planejamento-e-pesquisa/dnit-geo/mapas-multimodais/mapa-do-brasil>>. Acessado em 23 de outubro de 2018.

GEISSDOERFER, M. *et al.* The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757-768, 2017.

GIANI, M. I. *et al.* Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 104, Part A, p. 224-238, 2015.

GSCHÖSSER, F.; WALLBAUM, H.; BOESCH, M. E. Life-cycle assessment of the production of swiss road materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 2, p. 168-176, 2012.

HANSON, C.; NOLAND, R.; CAVALE, K. Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Materials Used in Road Construction. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2287, p. 174-181, 2012.

HUANG, Y.; SPRAY, A.; PARRY, T. Sensitivity analysis of methodological choices in road pavement LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 1, p. 93-101, 2013.

JAMSHIDI, A. *et al.* Characterization of effects of thermal property of aggregate on the carbon footprint of asphalt industries in China. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v4, Issue 2, p. 118-130, 2012.

KEIJZER, E. E. *et al.* Carbon footprint comparison of innovative techniques in the construction and maintenance of road infrastructure in The Netherlands. **Environmental Science & Policy**, v. 54, p. 218-225, 2015.

KHOSRAVIFAR, S.; GOULIAS, D. G.; SCHWARTZ, C. W. Laboratory evaluation of foamed asphalt stabilized base materials. *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, 2012. Oakland, CA. **Conference Paper 225 GSP**. p.1592-1601.

KUCUKVAR, M. *et al.* Stochastic decision modeling for sustainable pavement designs. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 6, p. 1185-1199, 2014.

LANDSBERG., J. J.; WARING., R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, Issue 3, p. 209-228, 1997.

LIU, S.; SHUKLA, A.; NANDRA, T. Technological, environmental and economic aspects of Asphalt recycling for road construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 879-893, 2009.

LIU, X.; CUI, Q.; SCHWARTZ, C. Greenhouse gas emissions of alternative pavement designs: Framework development and illustrative application. **Journal of Environmental Management**, v. 132, p. 313-322, 2014.

LOUHGHALAM, A.; AKBARIAN, M.; ULM, F. J. Carbon management of infrastructure performance: Integrated big data analytics and pavement-vehicle-interactions. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 956-964, 2017.

MILACHOWSKI, C., STENGEL, T., GEHLEN, C., 2011. Life Cycle Assessment for Road Construction and Use, pp. 1–2. Disponível em: <[http://www.eupave.eu/documents/technicalinformation/inventory-of-Documents/inventory-of-documents/eupave\\_life\\_cycle\\_assessment.pdf](http://www.eupave.eu/documents/technicalinformation/inventory-of-Documents/inventory-of-documents/eupave_life_cycle_assessment.pdf)>. Acessado em 23 de outubro de 2018.

MORETTI, L.; DI MASCIIO, P.; D'ANDREA, A. Environmental impact assessment of road asphalt pavements. **Modern Applied Science**, v. 7, n. 11, p. 1-11, 2013.

MROUEH, U.-M., ESKOLA, P., LAINE-YLIJOKI, J., WELLMAN, K., JUVANKOSKI, E.M.M., RUOTOISTENMÄKI, A., Life cycle assessment of road construction. **Finnra Rep**, v. 17 (2000), p. 1–65, 1999.

MROUEH, U.-M., ESKOLA, P., LAINE-YLIJOKI, J.J. Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. **Waste Manage**. V. 21 (2001), p. 271–277, 2001.

NAPA, National Asphalt Pavement Association. Disponível em <[https://www.asphaltpavement.org/images/stories/GL\\_101\\_Edition\\_3.pdf](https://www.asphaltpavement.org/images/stories/GL_101_Edition_3.pdf)>. Acessado em 23 de outubro de 2018.

OLSSON, S., KARRMAN, E., GUSTAFSSON, J. P., Environmental System Analysis of the use of Bottom ash from incineration of municipal waste for road construction. **Resour Conserv Recycl**, v48, p. 26-40, 2006.

PARANHOS, R. S.; PETTER, C. O. Multivariate data analysis applied in Hot-Mix asphalt plants. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 73, p. 1-10, 2013.

PARK, J. W.; AHN, Y. H. Development of a green road rating system for South Korea. **International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development**, v. 6, n. 4, p. 249-263, 2015.

PENG, B. *et al.* Evaluation system for CO<sub>2</sub> emission of hot asphalt mixture. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 2, n. 2, p. 116-124, 2015.

RCMC. Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects (PaLATE). Versão 2.0. **Recycled Materials Resource Center**, 2016. Disponível em <https://rmrc.wisc.edu/palate/> . Acesso em 23 de outubro de 2018.

ROCHA., S. J. S. S. D. *et al.* Balanço de carbono em três sistemas silvipastoril no Sudeste do Brasil. **Revista Espacios**, v. 38, p. 33, 2017.

SANTERO, N.; LOIJOS, A.; OCHSENDORF, J. Greenhouse Gas Emissions Reduction Opportunities for Concrete Pavements. **Journal of Industrial Ecology**, v. 17, n. 6, p. 859-868, 2013.

SANTOS, J.; FLINTSCH, G.; FERREIRA, A. Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, p. 15-31, 2017.

SANTOS, K. C. C.; NUNES-FILHO, M. S. Análise e interpretação das inovações advindas da lei 12.651/2012 que institui o novo código florestal. **Revista: CCCSS - Contribuciones a las Ciencias Sociales**, n. 2015- 01, publicado em 21 de janeiro de 2015. Disponível em: < <http://www.eumed.net/rev/cccss/2015/01/codigo-florestal.html>>> Acesso em 23 de outubro de 2018.

SCHLEGEL, T. *et al.* The limits of partial life cycle assessment studies in road construction practices: A case study on the use of hydrated lime in Hot Mix Asphalt. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 48, p. 141-160, 2016.

STRIPPLE, H., Life Cycle Assessment of Road - A Pilot Study for Inventory Analysis. 2 ed. Gothenburg, Sweden. **Swedish Environmental Research Institute (IVL)**, 2001.

TAHER, M. N. M.; AMAN, M. Y. An overview of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in Warm Mix Asphalt using foaming technology. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 11, n. 16, p. 9874-9881, 2016.

VASCONCELOS, A. M. de; BARICHELLO, R.; LEZANA, A. G. R.; FORCELLINI, F. A.; FERREIRA, M. G. G.; MIGUEL, P. A. C. Conceituação da experiência de serviços

por meio de uma revisão bibliográfica sistemática. **Produto & Produção**, v. 13, n. 3, p. 25-36, out. 2012.

XU, X.; CHEN, A.; YANG, C. A review of sustainable network design for road networks. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 3, p. 1084-1098, 2016.

ZAUMANIS, M.; JANSEN, J.; SMIRNOVS, J. Calculation model of energy consumption inventory for comparison of warm mix asphalt and Hot Mix Asphalt. In: FROEHNER, K. D. e CYGAS, D., 8th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2011, 2011. **Conference Paper** Vilnius Gediminas Technical University Publishing House "Technika". p.1246-1253.

ZHAO, K. *et al.* Impacts of highway construction and operation on carbon footprint in China: A case study of Jiangsu Province. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, v. 35, n. 5, p. 1468-1475, 2016.

### ANEXO A – Calculo do número N

Ano		Ônibus		Caminhões			Semi-Reboques					Reboques				TOTAL
		2C	3C	2C	3C	4C	2S1	2S2	2S3	3S2	3S3	3S2S2	3S2S2S2	3S2S4	3S3S3	
2019	1	39	22	211	277	117	22	87	14	63	89	64	85	19	0	1109
2020	2	40	22	217	286	121	22	90	15	65	91	66	88	19	0	1142
2021	3	41	23	223	294	124	23	93	15	67	94	68	91	20	0	1176
2022	4	42	24	230	303	128	24	96	16	69	97	70	93	20	0	1212
2023	5	43	24	237	312	132	24	98	16	71	100	72	96	21	0	1246
2024	6	45	25	244	321	136	25	101	16	73	103	74	99	21	0	1283
2025	7	46	26	251	331	140	26	104	17	75	106	77	102	22	0	1323
2026	8	47	27	259	341	144	27	107	17	77	109	79	105	23	0	1362
2027	9	49	27	267	351	148	27	111	18	80	112	81	108	23	0	1402
2028	10	50	28	275	362	153	28	114	18	82	115	84	111	24	0	1444

Número N - USACE		Número N - AASHTO	
Anual	Acumulado	Anual	Acumulado
2,69E+06	2,69E+06	6,61E+05	6,61E+05
2,77E+06	5,45E+06	6,81E+05	1,34E+06
2,85E+06	8,31E+06	7,02E+05	2,04E+06
2,93E+06	1,12E+07	7,23E+05	2,77E+06
3,02E+06	1,43E+07	7,43E+05	3,51E+06
3,11E+06	1,74E+07	7,64E+05	4,27E+06
3,21E+06	2,06E+07	7,89E+05	5,06E+06
3,30E+06	2,39E+07	8,12E+05	5,87E+06
3,39E+06	2,73E+07	8,36E+05	6,71E+06
3,50E+06	3,08E+07	8,61E+05	7,57E+06