EFEITOS AMBIENTAIS DA FALTA DE CONTROLE TECNOLÓGICO NA EXECUÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Felipe Costa Dias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientadores: Marcelino Aurélio Vieira da Silva
Sandra Oda

Rio de Janeiro
Maio de 2022

EFEITOS AMBIENTAIS DA FALTA DE CONTROLE TECNOLÓGICO NA EXECUÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Felipe Costa Dias

Maio/2022

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

Examinado por:

Prof. DSc. Marcelino Aurélio Vieira da Silva – PET/COPPE/UFRJ

Prof. DSc. Sandra Oda – DET/POLI/UFRJ

Prof. DSc. Oscar Aurelio Mendoza Reales - PEC/COPPE/UFRJ

Prof. DSc. José Leomar Fernandes Junior - STT/EESC/USP

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MAIO DE 2022

Dias, Felipe Costa

Efeitos ambientais da falta de controle tecnológico na execução de revestimentos asfálticos/Felipe Costa Dias. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XI, 93 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcelino Aurélio Vieira da Silva e Sandra Oda

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Engenharia de Transportes, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 78-83

1. Introdução 2. Análise de ciclo de vida. 3. Misturas asfálticas usinadas I. Silva, Marcelino Aurélio Vieira *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por iluminar o meu caminho em todos os momentos.

Ao meu orientador Marcelino Aurélio, por todo o conhecimento e oportunidades oferecidas ao longo dos últimos anos.

À minha orientadora, e amiga, Sandra Oda, que sempre compartilha sua sabedoria e paciência com os “alunos-filhos”.

Aos meus pais, pela compreensão e confiança diante das minhas decisões e incertezas.

Aos meus avós, que são as maiores fontes de carinho, acolhimento e segurança que uma pessoa pode ter.

À Mariana, minha namorada e companheira, por dividir todos os momentos, dúvidas e planos (e que não foram poucos).

Aos amigos que fiz no PET e tornaram a rotina de pesquisa mais fácil: Bruno, Camilla e Bia.

Aos amigos que, perto ou longe, sempre posso contar: Paola, Rafael, Tayse, Cris, Mathias, Karoline, Gabriela, Vitor, Shê, Larissa e Bruna.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

EFEITOS AMBIENTAIS DA FALTA DE CONTROLE TECNOLÓGICO NA EXECUÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Felipe Costa Dias

Maio/2022

Orientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva e Sandra Oda

Programa: Engenharia de Transportes

As atividades realizadas pela sociedade produzem impactos ambientais significativos, considerando principalmente a extração de materiais, emissões de gases poluentes e poluição de corpos d'água. Em alguns países, o setor de transportes é um dos principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa (GEE). Parte dos impactos provocados se deve pelo consumo de materiais não renováveis na construção da infraestrutura de transporte. Dessa forma, os impactos ambientais podem ser mitigados pelo emprego correto de materiais e técnicas construtivas. O objetivo do estudo é analisar os impactos provocados pela falta de controle tecnológico na execução de revestimentos asfálticos considerando as etapas de exploração de materiais, usinagem, construção e manutenção. O dimensionamento e a estimativa da vida útil do pavimento foram realizados utilizando o software MeDiNa. A Análise do Ciclo de Vida considerou os materiais e espessuras da estrutura. Com o intuito de aliar conceitos da engenharia de pavimentação com as análises ambientais, o estudo abordou uma nova métrica para análise dos cenários, estabelecendo a razão entre indicadores ambientais e vida útil. Como resultado, foi verificado que as misturas compactadas com temperatura mais baixa provocam maior prejuízo ambiental ao longo do ciclo de vida, chegando a um aumento das razões $CO_{2\ eq}$/VU e Energia/VU de 88,0% e 80,6%, respectivamente.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ENVIRONMENTAL EFFECTS OF THE LACK OF TECHNOLOGICAL CONTROL IN THE CONSTRUCTION OF ASPHALT COATINGS

Felipe Costa Dias

May/2022

Advisor: Marcelino Aurélio Vieira da Silva and Sandra Oda

Program: Transportation Engineering

The activities carried out by society produce significant environmental impacts, especially considering the extraction of materials, emissions of polluting gases and pollution of bodies of water. In some countries, the transport sector is one of the main responsible for the emission of greenhouse gases (GHG). Part of the impacts caused is due to the consumption of non-renewable materials in the construction of transport infrastructure. In this way, environmental impacts can be mitigated by the correct use of materials and construction techniques. The objective of the study is to analyze the impacts caused by the lack of technological control in the execution of asphalt coatings, considering the stages of material exploration, production, construction and maintenance. The design and estimation of the useful life of the pavement were carried out using the MeDiNa software. The Life Cycle Analysis considered the materials and thicknesses of the structure. In order to combine pavement engineering concepts with environmental analysis, the study addressed a new metric for scenario analysis, establishing the ratio between environmental indicators and useful life. As a result, it was verified that the mixtures compacted with lower temperature cause greater environmental damage throughout the life cycle, reaching an increase in the CO2 eq/VU and Energy/VU ratios of 88,0% and 80,6%, respectively.

Sumário

1 Introdução 1

1.1 Justificativa 3
1.2 Objetivos da pesquisa 5
1.3 Roteiro Metodológico 7

2 Pavimentos Flexíveis 8

2.1 Misturas asfálticas usinadas 10
2.2 Influência da temperatura e da energia de compactação 11
2.3 Controle tecnológico da execução do revestimento asfáltico 14
2.3.1 Ensaios de ligantes asfálticos 15
2.3.2 Ensaios de agregados 17
2.3.3 Ensaios de misturas asfálticas 19
2.3.4 Periodicidade de realização de ensaios 21

3 Análise de Ciclo de Vida 23

3.1 Etapas de estudo 24
3.2 Indicadores utilizados 28

4 Referencial Teórico 34

4.2 Principais Periódicos 38
4.3 Evolução do número de artigos publicados ao longo dos anos 39
4.4 Principais palavras-chave relacionadas ao tema 40

5 Materiais e métodos 41

5.1 Dimensionamento 41
5.1.1 Software MeDiNa 41
5.2 Definição de cenários 42
5.3 Cálculo de emissões 45

6 Estudo de caso 48

6.1 Coleta de dados 48
6.2 Cenários de análise 49

7 Discussão e resultados 65

8 Conclusão 74

Referências 76

Anexos 82

Lista de Figuras

Figura 1: Resumo gráfico do processo de Análise de Ciclo de Vida 3

Figura 2: Estrutura básica de um ACV 23

Figura 3: Fluxograma do processo de pesquisa de artigos 35

Figura 4: Número de publicações dos autores com maior número de artigos 36

Figura 5: Número de publicações por ano 39

Figura 6: Fluxograma do procedimento metodológico 44

Figura 7: Estrutura do pavimento 53

Figura 8: Eficiência dos cenários do estudo de caso ($CO_{2\ eq}$) - construção 68

Figura 9: Eficiência dos cenários do estudo de caso (Energia) - construção 69

Figura 10: Eficiência dos cenários do estudo de caso (CO2 eq) – manutenção 72

Figura 11: Eficiência dos cenários do estudo de caso (Energia) – manutenção 73

Lista de Tabelas

Tabela 1: Resumo dos ensaios de controle tecnológico 14

Tabela 2: Periodicidade de realização de ensaios 21

Tabela 3: Fases utilizadas em pesquisas de Análise de Ciclo de Vida 26

Tabela 4: Indicadores utilizados em pesquisas de Análise de Ciclo de Vida 30

Tabela 5: Número de contribuições por autor 37

Tabela 6: Produtividade dos periódicos analisados 38

Tabela 7: Frequência de palavras-chave 40

Tabela 8: Contribuição relativa de cada substância para incremento de Gases de Efeito Estufa 44

Tabela 9: Cenários utilizados no estudo de caso 49

Tabela 10: Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas 50

Tabela 11: Características das misturas asfálticas utilizadas 51

Tabela 12: Estrutura do pavimento (dimensionamento) 52

Tabela 13: Vida útil dos cenários após dimensionamento 53

Tabela 14: Emissões de gases de efeito estufa e quantidade de energia relacionadas à produção dos insumos 54

Tabela 15: Coeficiente de combustível de equipamentos – construção 55

Tabela 16: Composição da construção da sub-base 56

Tabela 17: Composição da usinagem da BGS 57

Tabela 18: Composição da construção da BGS 58

Tabela 19: Composição da construção de revestimento asfáltico 59

Tabela 20: Composição da usinagem de revestimento asfáltico 60

Tabela 21: Vida útil dos cenários após a manutenção 62

Tabela 22: Coeficiente de combustível - manutenção 63

Tabela 23: Composição da fresagem de revestimento asfáltico 64

Tabela 24: Emissões por cenário - construção 66

Tabela 25: Relação entre indicadores em relação à mistura padrão - construção 67

Tabela 26: Emissões por cenário - construção e manutenção 70

Tabela 27: Relação entre indicadores em relação à mistura padrão - manutenção 71

Tabela 28: Comparação de cenários após a manutenção 73

1 Introdução

Os avanços tecnológicos trouxeram benefícios à sociedade moderna em diversos setores, como melhorias no transporte, na saúde e na comunicação. Apesar de benéficas para o bem-estar da população, muitas tecnologias provocam impactos no meio ambiente, através da geração de resíduos, contaminação de corpos d'água ou até mesmo pelo incentivo do consumo excessivo de determinada matéria prima.

O setor de transportes fornece notáveis contribuições para a degradação do meio ambiente, seja pela poluição da atmosfera provocada pela queima de combustíveis pelos veículos, ou pelo uso do solo, que desmata grandes extensões para a passagem de uma rodovia ou ferrovia. Estima-se que esse setor tenha produzido 7,0 $GtCO_{2\ eq}$ de emissões diretas de gases de efeito estufa no ano de 2010, podendo chegar a 12,0 $GtCO_{2\ eq}$ por ano até 2050 (IPCC, 2014). Nos Estados Unidos, o setor de transporte foi responsável por 28,6% das emissões de $CO_{2\ eq}$ no ano de 2019, identificado como a maior contribuição das emissões entre os setores da economia do ano de estudo (United States Environmental Protection Agency, 2021)

A criação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em 2015, resultado da ação coletiva das Nações Unidas em conjunto aos governos e a sociedade civil, propôs uma nova agenda de desenvolvimento. Os ODS buscam tomar medidas orientadas visando o fim da pobreza, promover a prosperidade e bem-estar da sociedade e enfrentar as mudanças climáticas. Esses objetivos se basearam nos oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), definidos após a Cúpula do Milênio, em 2000. Foram definidos 17 ODS, de modo que as 169 metas traçadas alcancem as intenções que os ODM deixaram em aberto.

Considerando a constante necessidade de construção, ampliação e manutenção da rede rodoviária, a concepção de rodovias mais sustentáveis promove a utilização mais consciente dos materiais empregados nas camadas do pavimento, além de valorizar os estudos de impactos ambientais, alinhando-se ao que foi proposto pelos ODS. Entre os objetivos abordados, pode-se apontar a construção de infraestruturas resilientes, a promoção da industrialização inclusiva e sustentável e o fomento da inovação; o que contribuirá para tornar as cidades e assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, assegurando padrões de produção e de consumo sustentáveis.

A construção e manutenção de rodovias gera impactos consideráveis na sociedade, tanto positivos como negativos. De um lado tem-se a melhoria na rede de transportes, que promove acessibilidade a serviços e oportunidades; por outro lado, há principalmente a degradação do meio ambiente, promovida pela ocupação e uso do solo, pela queima de combustíveis pelos veículos e pela construção em si, que utiliza materiais de origem fóssil.

A implantação de novas rodovias pode ter resultados mais ambientalmente sustentáveis quando há essa preocupação ainda na fase de projeto, tendo em vista as alternativas geradas pelos avanços feitos pela ciência nessa área, ou seja, a adoção de medidas sustentáveis não se limita à escolha de materiais reciclados, podendo ser representada também por ações de gerenciamento de pavimentos. A gestão das ferramentas e controles de execução podem contribuir para a redução de emissões durante a vida útil de uma estrutura de pavimento, constituindo assim uma ação de promoção de sustentabilidade ambiental.

As emissões produzidas pelos pavimentos podem ser analisadas utilizando a ferramenta de Análise de Ciclo de Vida (ACV), já que considera várias etapas da vida útil da estrutura, podendo ser considerada uma abordagem de estudo mais holística. Esse tipo de estudo divide a vida útil de um processo ou estrutura em diversas etapas, considerando as emissões provenientes da extração de materiais, beneficiamento, construção e reciclagem (Figura 1). A ferramenta também permite com que outras etapas sejam estudadas de acordo com a necessidade do estudo, como etapa de uso da estrutura e transporte de materiais.

As ferramentas mais recentes de análise de ciclo de vida permitem contabilizar de maneira sistemática as emissões produzidas em várias etapas da vida do pavimento, resultando em uma análise mais completa. Essas ferramentas podem ser utilizadas tanto para a seleção de materiais quanto para a definição de estratégias de manutenção de rodovias. Nesse contexto podem ser simulados, através de softwares específicos, os defeitos que provavelmente ocorrerão nos pavimentos; para então, analisar seus desdobramentos em termos de emissões para o meio ambiente.

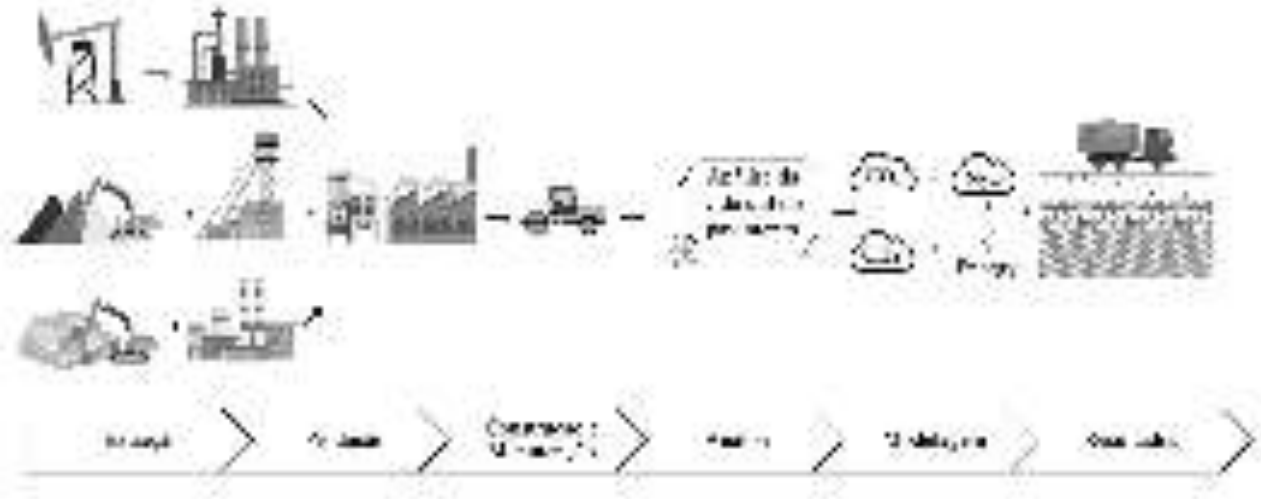


Figura 1: Resumo gráfico do processo de Análise de Ciclo de Vida

Fonte: Adaptado de Nascimento et al. (2020)

1.1 Justificativa

A tomada de decisão relacionada ao gerenciamento de pavimentos costuma aplicar a Análise de Ciclo de Vida (ACV) considerando os custos ao longo desse ciclo, definindo as propostas de manutenção e reabilitação sob ótica exclusivamente monetária, respeitando as características e propriedades mecânicas dos materiais. A nova abordagem dessa ferramenta, incluindo aspectos ambientais, pode fornecer informações relevantes e influenciar os tomadores de decisões e gerentes de redes de pavimentos. (Santos *et al.*, 2017)

Embora ainda não seja usual na gerência de pavimentos, a comparação entre materiais pode ser feita utilizando a ACV. A análise pode ser feita de forma que evidencie os impactos da adoção de novas tecnologias ou materiais para uma determinada intervenção ou construção.

Diante da demanda do mercado por processos de fabricação mais eficientes em termos de energia, diversos materiais são desenvolvidos para suprir essa necessidade. Os aspectos mencionados podem resultar ainda em vantagens econômicas e ambientais, podendo citar a combinação de asfalto reciclado e misturas mornas. (Giani *et al.*, 2015)

Há uma tendência pela procura por materiais que produzem menos emissões ao meio ambiente, ou com menor consumo energético (Araújo *et al.*, 2014; Hasan *et al.*, 2020;

Santos *et al.*, 2021); ou ainda por técnicas que promovam a redução de impactos (Celauro *et al.*, 2016; Gulotta *et al.*, 2019). O correto uso da ACV pode impactar também as decisões tomadas na fase de projeto (Batouli *et al.*, 2017).

A aplicação de ACV pode ser aliada a ferramentas de análises multicritério que auxiliam a tomada de decisões a partir da otimização da relação de *inputs* e *outputs* (Nascimento *et al.*, 2020). A aplicação dessas ferramentas pode auxiliar análises em que o custo é introduzido como fator a ser otimizado, além das emissões ambientais produzidas ao longo do ciclo de vida.

Nesse contexto, há espaço para a melhoria do desempenho dos pavimentos por meio da aplicação de técnicas de gerenciamento e controle de qualidade, fazendo com que sejam identificados os fatores que mais prejudicam as estruturas analisadas para a futura mitigação. Diversas falhas podem resultar em pavimentos com qualidades inferiores às projetadas, entretanto, o controle da temperatura e energia de compactação na execução da camada do revestimento composto por misturas asfálticas a quente são os principais fatores que podem variar em campo, pois dependem principalmente da atenção e experiência da equipe de construção.

A temperatura de aplicação de uma mistura asfáltica em pista pode ser influenciada por diversos fatores, como distância entre a usina e o local de execução, condições climáticas e proteção do material no caminhão durante o transporte até a obra, entre outros, sendo necessário verificar a temperatura antes da sua aplicação. Esta ação permite inferir se a mistura asfáltica apresenta características adequadas de trabalhabilidade que possibilite o espalhamento e a compactação do material de forma que resulte no revestimento com características adequadas e previstas no projeto (Balbo, 2007).

Caso as temperaturas dos materiais, da mistura e de compactação previstas não sejam atendidas, o revestimento asfáltico pode apresentar problemas. A temperatura elevada tende a fazer a mistura fluir, provocando deformações resultantes de uma menor ligação e maior lubrificação. Por outro lado, a baixa temperatura dificulta a compactação da mistura, pois o ligante asfáltico fica muito plástico e pegajoso, resultando em um material com densidade inadequada (Bernucci *et al.*, 2006).

1.2 Objetivos da pesquisa

O objetivo principal proposto pelo presente trabalho é investigar a relação entre o controle tecnológico de execução de misturas asfálticas e a variação dos parâmetros ambientais considerando o ciclo de vida dos pavimentos. Para esse estudo foram utilizados os parâmetros de emissão de $CO_{2\ eq}$ e energia primária requerida.

A decisão sobre os parâmetros adotados no estudo foi baseada na revisão bibliográfica que propôs identificar os principais indicadores utilizados nesse tipo de estudo. Como resultado, os gases CO_2 (Dióxido de carbono), CH_4 (Metano) e N_2O (Óxido nitroso) foram identificados como os principais gases emitidos durante a construção de pavimentos com revestimentos asfálticos, podendo ser convertidos em dióxido de carbono equivalente para a interpretação dos resultados. O parâmetro de energia primaria requerida (GER) foi incorporado ao estudo como forma de abordagem das questões energéticas, também comumente encontradas na revisão bibliográfica, além das emissões atmosféricas.

Nesse contexto, o trabalho se propõe a responder às perguntas:

- O controle tecnológico mais rigoroso da execução de misturas asfálticas produz algum efeito em termos ambientais ou se restringem a melhorias mecânicas da camada?
- Em caso afirmativo, qual característica de monitoração produz melhores resultados?
- Em termos quantitativos, qual é o impacto que o controle tecnológico pode produzir comparando uma execução controlada e uma não controlada?

Dessa forma, espera-se analisar o ciclo de vida de pavimentos, considerando os indicadores mencionados, abordando as fases de extração, produção, construção e manutenção dos cenários propostos. O presente trabalho possui, resumidamente, os seguintes objetivos:

- Analisar os benefícios ambientais de um controle tecnológico bem realizado na etapa de execução;
- Abordar os indicadores ambientais mais utilizados para os cenários estipulados;
- Verificar quais condições de execução provocam mais prejuízos ao meio ambiente;

- Adaptar os indicadores usuais na literatura em forma de um indicador de eficiência para pavimentos.

1.3 Roteiro Metodológico

A presente dissertação foi dividida em 8 capítulos. O primeiro capítulo aborda uma introdução ao tema, com as considerações iniciais, o problema de pesquisa, os objetivos e a justificativa.

Nos capítulos 2 e 3 serão apresentados conceitos da revisão bibliográfica, que formarão a base teórica para as discussões apresentadas. No capítulo 2 serão abordados os conceitos sobre controle tecnológico, expondo também as principais características e propriedades de misturas asfálticas utilizadas como revestimento de pavimentos, enquanto o capítulo 3 apresentará definições sobre a ACV. A revisão bilbiométrica será apresentada no capítulo 4, incluindo as análises feitas sobre as publicações, autores e periódicos encontrados.

O procedimento metodológico utilizado para o estudo será discutido no capítulo 5, seguido da aplicação do estudo de caso no capítulo 6. Por fim, as discussões e conclusões serão tratadas nos capítulos 7 e 8, respectivamente.

2 Pavimentos Flexíveis

Segundo Yoder e Witczak (1975), tecnicamente, "o pavimento é uma estrutura composta por camadas construída sobre uma fundação (terreno natural) denominada de subleito", que recebe em sua superfície solicitações do tráfego de veículos com rodas flexíveis (pneus) e as suas principais funções são:

- resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego;
- melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança;
- resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento;
- resistir às ações do intemperismo.

Os pavimentos são divididos em duas categorias: rígido ou flexível (Yoder e Witczak, 1975). O pavimento rígido é constituído por placa de concreto de cimento Portland e pode ou não ter uma camada de sub-base entre a placa e o subleito. O pavimento flexível é constituído de uma camada de rolamento de pequena espessura, aplicada sobre camadas de base e de sub-base que são construídas sobre o subleito compactado.

No Brasil, assim como em diversos países, a maioria dos pavimentos é composta por revestimento asfáltico sobre camadas granulares, ou seja, por pavimento flexível. Apenas 2% apresenta na camada de rolamento ou revestimento uma placa de concreto de cimento, que também tem função de base, ou seja, pavimento rígido (Carvalho, 2018).

Um pavimento flexível pode ser composto pelas seguintes camadas (DNIT, 2006):

- revestimento ou capa de rolamento: é a camada que tem a função de receber diretamente os esforços provenientes do tráfego e transmiti-los às camadas inferiores, proporcionar uma superfície de rolamento com conforto e segurança. Deve ainda impermeabilizar o pavimento, protegendo as camadas inferiores e conferir resistência às intempéries;
- base: é a camada executada abaixo do revestimento, destinada a resistir às ações dos veículos e a transmiti-las, de forma conveniente, à camada subjacente. Pode ser executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado;

- sub-base: camada construída entre o subleito (ou camada de reforço) e a camada de base, tem como objetivo evitar o bombeamento do solo do subleito para a camada de base. O material empregado deve ter boa capacidade de suporte;
- reforço do subleito: é uma camada de espessura constante sobre o subleito regularizado, constituída por solo de qualidade superior à do subleito.

A quantidade de camadas e suas espessuras variam com a qualidade do subleito, com o tráfego que irá solicitar o pavimento e as características dos materiais que irão compor a sua estrutura, sendo que as camadas mais próximas da superfície devem apresentar melhores características (maior resistência) e, consequentemente, poderão apresentar custos mais elevados.

O revestimento, seja no pavimento flexível ou no rígido, é a camada superficial, que fica em contato direto com as cargas do tráfego. No caso de pavimentos flexíveis, o revestimento, geralmente, é composto por uma mistura asfáltica.

2.1 Misturas asfálticas usinadas

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), também chamado de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) ou Concreto Asfáltico (CA), pode ser considerado como a mistura asfáltica mais comum e tradicional empregada no país. Essa mistura é obtida a partir da combinação de agregados minerais bem graduados, material fino de enchimento (fíler), e de cimento asfáltico de petróleo (conhecido como CAP), misturada e compactada a quente (Balbo, 2007).

As misturas asfálticas podem ser subdividas em três grupos quanto à graduação dos agregados: densa, aberta e descontínua. O primeiro tipo apresenta uma curva granulométrica contínua e bem graduada, com poucos vazios, visto que os agregados menores preenchem os vazios deixados pelos maiores. A graduação aberta possui curva granulométrica uniforme, com agregados quase de um mesmo tamanho, resultando em muitos vazios. A graduação descontínua possui um esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente devido às proporções da curva granulométrica com grãos de maiores dimensões e maior resistência em quantidade dominante.

No entanto, as propriedades volumétricas de uma mistura asfáltica dependem da interação de seus componentes majoritários: ligante asfáltico e agregados. Essa interação influencia a estabilidade das misturas, necessitando de parâmetros que indiquem se o material apresenta características para ser utilizado. O volume de vazios pode ser utilizado como um parâmetro alvo indicador de um certo grau de intertravamento da mistura asfáltica (Cheng *et al.*, 2021). Para atingir o volume de vazios adequado, previsto em norma e definido no projeto, um dos fatores mais importante é a temperatura (dos materiais, da mistura e da compactação), que irá influenciar diretamente na qualidade final da camada de revestimento. Portanto, o controle tecnológico da produção e aplicação da mistura asfáltica deve incluir a temperatura como um dos elementos mais importantes.

Segundo o NCHRP (2011), uma mistura asfáltica quando aplicada na camada superficial do pavimento (revestimento ou capa) deve apresentar as seguintes propriedades:

- resistência à deformação permanente (em temperaturas elevadas): a mistura não deve deformar ou ser deslocada quando submetidos às cargas de tráfego;
- resistência à fadiga: a mistura não deve trincar quando submetida a cargas repetidas de tráfego num determinado período de tempo;

- resistência às trincas térmicas (a baixa temperatura): a mistura não deve trincar quando submetida a temperaturas baixas; esta propriedade é mais comum em regiões de clima frio;
- durabilidade: a mistura deve conter cimento asfáltico suficiente para garantir uma adequada espessura da película asfáltica em torno das partículas de agregados. Além disso, a mistura compactada não deve ter vazios muito elevados, pois isso acelera o processo de envelhecimento;
- resistência à umidade por dano induzido;
- resistência à derrapagem;
- trabalhabilidade: a mistura deve apresentar facilidade de ser aplicada e compactada;
- baixo ruído e boas propriedades de drenagem.

Para produzir misturas asfálticas que atendam essas propriedades é fundamental utilizar um método de dosagem, que possibilite a seleção e avaliação de materiais (individualmente e também da mistura de materiais), assim como a definição das proporções de cada material. No Brasil, a mistura asfáltica mais empregada é a usinada a quente e o método de dosagem é o Marshall.

A mistura asfáltica usinada a quente é composta de agregados e de ligante asfáltico, misturados em usina apropriada, aplicados e compactados a quente. Os agregados, geralmente, representam 95% da mistura em peso, enquanto o ligante asfáltico os restantes 5%. Em alguns casos, podem ser adicionados aditivos a mistura asfáltica para melhorar seu desempenho, como fibras, polímeros, borracha, melhoradores de adesividade, etc. (NCHRP, 2011)

2.2 Influência da temperatura e da energia de compactação

Antes de ser solicitada pelas cargas de tráfego, a mistura asfáltica empregada na camada do revestimento é submetida às etapas de mistura (normalmente em usina), lançamento e compactação. Nessas etapas, o ligante asfáltico deve apresentar o comportamento de um fluido, facilitando sua mistura com os agregados minerais e aumentando a eficiência da compactação (NCHRP, 2011).

Por isso é fundamental a aplicação das temperaturas adequadas para que o revestimento seja executado da melhor forma possível, atendendo as especificações e as solicitações de tráfego durante toda sua vida útil. A propriedade utilizada para caracterizar o comportamento dos ligantes asfálticos a altas temperaturas é a viscosidade (NCHRP, 2011). No caso de misturas com ligantes asfálticos puros, os intervalos das temperaturas adequadas para a mistura na usina e a compactação no campo devem ser determinados através dos resultados de ensaios de viscosidade do ligante asfáltico.

Os valores recomendados a partir do ensaio executado com equipamento Saybolt-Furol são aqueles correspondentes a viscosidade de 75 a 95 sSF para mistura e de 125 a 155 sSF para compactação e de 170 ± 20 cP para a mistura e de 280 ± 30 cP para a compactação quando executado ensaio com equipamento Brookfield (DNIT, 2006).

A compactação pode ser caracterizada como o processo ao qual misturas asfálticas são submetidas com a finalidade de garantir que o material granular solto adquira coesão. A má execução desse processo pode comprometer o desempenho e encurtar o tempo de vida útil do revestimento (Bi *et al.*, 2021).

A característica viscoelástica apresentada pelas misturas asfálticas explica a variação de comportamento do material frente à diferentes temperaturas e taxas de carregamento (Motamedi *et al.*, 2020). Dessa forma, esse comportamento também pode ser notado no processo de compactação do revestimento asfáltico, resultando em misturas com características diferentes, dependendo da temperatura e energia aplicadas, apesar dos materiais constituintes serem os mesmos.

O controle da temperatura da mistura asfáltica se faz necessário tanto na produção da massa quanto no momento da sua aplicação, de forma a garantir a trabalhabilidade adequada, permitindo o espalhamento e a compactação da mistura sem a perda das características definidas em projeto. A compactação de misturas asfálticas com temperatura inferior à especificada em projeto pode resultar em: perda de estabilidade da mistura, diminuição da resistência a tração, redução do módulo de resiliência, surgimento precoce de deformação plástica, entre outros defeitos (Balbo, 2007).

A compactação da mistura em campo é usualmente feita com o auxílio de rolos compactadores. Nesse processo, o número de vezes que o rolo compactador passa sobre a mistura pode influenciar o desempenho do revestimento, podendo acelerar o processo

de degradação e deterioração da camada. A aplicação de energia de compactação deve variar de acordo com a espessura da camada, temperatura da mistura, condições climáticas e tipo de maquinário (Zhao *et al.*, 2021).

2.3 Controle tecnológico da execução do revestimento asfáltico

A construção do revestimento de um pavimento deve passar por controle criterioso, tanto dos elementos que compõem a mistura, como do revestimento asfáltico em si. Esse controle é previsto pela norma DNIT 031/2006 – ES.

A norma recomenda os ensaios específicos que permitem verificar e garantir que as propriedades dos materiais utilizados e definidos em projeto sejam atendidas. De forma complementar, também é definida a periodicidade de cada ensaio para que não exista diferença nas propriedades das misturas produzidas em diferentes bateladas ou nos carregamentos de material.

Alguns ensaios são recomendados pela norma para evitar possíveis acidentes específicos, como os ensaio de espuma. Considerando as altas temperaturas que o concreto asfáltico necessita para a sua correta execução, algumas situações podem ser evitadas a partir da verificação das características do ligante asfáltico através de ensaios específicos.

Os principais ensaios são indicados de acordo com a etapa de estudo: análise, caracterização e dosagem dos materiais da mistura asfáltica e controle tecnológico durante a execução das camadas do pavimento. A Tabela 1 apresenta os ensaios recomendados pela norma DNIT 031/2006 – ES para o controle tecnológico de misturas asfálticas.

Tabela 1: Resumo dos ensaios de controle tecnológico

Material	Ensaio	Função
Ligantes Asfálticos	Penetração	Ensaio muito utilizado para a especificação de cimentos asfálticos. Mede a "dureza" do ligante.
	Ponto de Fulgor	Ensaio relacionado à segurança. Impede que os gases liberados pelo ligante se inflamem.
	Espuma	Ensaio relacionado à segurança. Identifica se há água no ligante, o que pode provocar acidentes durante o aquecimento do material.
	Suscetibilidade Térmica	Indica a variação da consistência do ligante frente a variação de temperatura.
	Viscosidade	Indica a resistência ao escoamento do CAP.
Agregados	Desgaste Los Angeles	Verifica se os agregados suportam as solicitações sem apresentarem degradação excessiva.
	Adesividade	Verifica se há descolamento da película de ligante asfáltico do agregado.

Material	Ensaio	Função
	Índice de Forma	Verifica o formato das partículas de agregado.
	Granulometria	Indica o tamanho das partículas de agregado.
	Equivalente de areia	Identifica a proporção relativa de argila ou pó em agregado miúdo.
Misturas Asfálticas	Marshall	Relacionado ao desempenho do material. Ensaio que indica a estabilidade e fluência das misturas
	Resistência à Tração	Ensaio de ruptura que provoca a tração através da compressão diametral. A resistência à tração possui boa correlação com o módulo de resiliência do material.
	Teor de betume	Ensaio que confere a porcentagem de betume usada em relação à massa total da amostra

Fonte: Elaboração própria

2.3.1 Ensaios de ligantes asfálticos

O ligante asfáltico é um material amplamente utilizado em construções devido às suas características, sendo importante citar a capacidade de proporcionar uma forte união dos agregados e ter uma flexibilidade controlável. Apesar de apresentar diversas vantagens no seu uso, o asfalto é um material termoviscoelástico, o que significa que seu comportamento também varia com a sua temperatura. Desta forma, para um melhor aproveitamento, diferentes ensaios são necessários para garantir o melhor desempenho do material.

A realização de ensaios deve ser feita de forma que as propriedades da massa asfáltica produzida sejam conhecidas, e consequentemente respeitem as normas técnicas e se assemelhem ao projeto. O controle da inspeção referente ao ligante asfáltico diz respeito justamente ao confronto dos resultados produzidos com os intervalos definidos pelas normas brasileiras e o atendimento do projeto.

2.3.1.1 Determinação de Penetração

O ensaio mede, em décimos de milímetros, a penetração de uma agulha no ligante asfáltico a 25°C durante 5 segundos. Este ensaio é utilizado comumente para a especificação de cimentos asfálticos em diversos países. O ensaio é normalizado por: NBR 6567/98 e DNER-ME 003/99.

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização do ensaio para todos os carregamentos de ligante asfáltico.

2.3.1.2 Determinação de Ponto de Fulgor

O ensaio de ponto de fulgor está diretamente relacionado com a segurança durante o seu manuseio. O ensaio caracteriza qual é a menor temperatura na qual os vapores emitidos pelo aquecimento do material se inflamam por contato com uma chama padrão. O ensaio é normalizado por: NBR 11341/2004 e DNER-ME 148/94.

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização do ensaio para todos os carregamentos de ligante asfáltico.

2.3.1.3 Ensaio de Espuma

A presença de água no CAP pode ser perigosa durante o aquecimento do material. Essa situação pode causar explosões ocasionadas pela dificuldade liberar as bolhas de água. Apesar de não existir uma norma específica para este ensaio, a especificação brasileira de CAP, prevê que o ligante não deveria espumar quando aquecido até 175°C.

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização do ensaio para todos os carregamentos de ligante asfáltico.

2.3.1.4 Determinação de Suscetibilidade Térmica

A suscetibilidade térmica do ligante asfáltico indica a sensibilidade da sua consistência frente à variação de temperatura. Por ser caracterizado como um material termoviscoplástico, não é desejável que haja uma alta suscetibilidade térmica (Bernucci *et al.*, 2006).

Há diferentes abordagens para mensurar esta propriedade do material, sendo usualmente adotado o procedimento proposto por Pfeiffer e Van Doormaal, determinando a suscetibilidade a partir do ponto de amolecimento e da penetração do CAP. O ensaio de ponto de amolecimento, conhecido como Anel e Bola, é uma medida empírica que verifica a temperatura em que o asfalto amolece, ocorrendo uma condição de escoamento específica. O ensaio é normalizado por: NBR 6560/2000

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização do ensaio de suscetibilidade térmica para cada 100t de carregamento de ligante asfáltico.

2.3.1.5 Determinação de Viscosidade

O Ensaio de viscosidade se refere à propriedade de resistência ao escoamento, podendo ser interpretado como uma medida da consistência. Os ensaios de viscosidade foram desenvolvidos a partir dos princípios de mecânica dos fluídos, considerando uma tensão de cisalhamento aplicada e a velocidade de deformação. Para estudar esta propriedade, foram desenvolvidos diversos viscosímetros, entretanto os mais famosos são viscosímetro de Saybolt-Furol e o rotacional (Brookfield). Os ensaios são normalizados por: NBR 14756/2001, para Saybolt-Furol e NBR 15184 para Brookfield.

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização do ensaio para cada 100t de carregamento de ligante asfáltico.

2.3.2 Ensaios de agregados

Os revestimentos asfálticos usuais podem ser definidos como uma associação de agregados, ligante asfáltico, e em casos particulares, produtos complementares. Sendo assim, fica evidente a necessidade da investigação das propriedades dos componentes que constituem os revestimentos para assegurar o seu desempenho projetado.

2.3.2.1 Determinação de desgaste por abrasão Los Angeles

O ensaio de desgaste simula o fenômeno de abrasão dos agregados que acontece durante a passagem do tráfego, assim como no manuseio e execução do pavimento. O material deve resistir às solicitações sem apresentar degradação, quebras ou até desintegração.

O ensaio de Los Angeles simula, através da submissão do agregado à 500 ou 1000 revoluções junto com esferas de aço em um equipamento padronizado, o desgaste dos agregados estudados. Este processo induz o impacto entre as partículas, sendo avaliado pela redução de massa dos agregados retidos na peneira de 1,7mm. O ensaio é normalizado por: DNER-ME 035/98 e DNER-ME 222/94

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização do ensaio em casos de dúvidas ou variações quanto à origem e natureza dos materiais.

2.3.2.2 Determinação de Adesividade

A avaliação da adesividade do ligante asfáltico ao agregado consiste em verificar se ocorre o descolamento ou separação da película de ligante pela ação da água. Os ensaios que abordam esta propriedade podem ser divididos em dois grupos: aqueles que avaliam o comportamento das partículas de agregado cobertas por ligante e os que avaliam o desempenho de misturas asfálticas sob ação da água. O ensaio é normalizado por: DNER-ME 078/94 e DNER-ME 079/94

O ensaio de dano por umidade induzida simula a adesividade pela relação entre a resistência à tração, por compressão diametral, de corpos de prova à 25ºC (sem condicionamento) e corpos de prova submetidos à saturação parcial e baixas temperaturas. O ensaio ficou conhecido como Lottman modificado e é normalizado pela norma DNIT-ME 180/2018.

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização do ensaio em casos de dúvidas ou variações quanto à origem e natureza dos materiais.

2.3.2.3 Determinação de Índice de Forma

A trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica possuem relação direta com a forma dos agregados utilizados. Partículas irregulares apresentam melhor intertravamento quanto mais “cúbicas” forem, ao invés de alongadas ou lamelares. O ensaio é normalizado por: DNER-ME 086/94 ou NBR 6954/1989.

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização do ensaio em casos de dúvidas ou variações quanto à origem e natureza dos materiais.

2.3.2.4 Determinação da Granulometria

O ensaio de granulometria determina a curva granulométrica do material a partir da porcentagem retida em cada peneira. Dessa forma, a curva granulométrica é obtida de acordo com o tamanho das partículas do agregado. A importância da realização do ensaio

está diretamente relacionada com a estabilidade da mistura. O ensaio é normalizado por: DNER-ME 083/98.

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização de dois ensaios para cada silo quente, por cada jornada de oito horas de trabalho, além de um ensaio do material de enchimento (filer) por cada jornada de oito horas de trabalho.

2.3.2.5 Determinação do Equivalente de Areia

O equivalente de areia é determinado pela proporção relativa de argila ou pó em amostras de agregado miúdo. Neste ensaio, a amostra é colocada em uma proveta com solução de cloreto de cálcio-glicerina-formaldeído. Após o ensaio, é possível determinar a altura de material floculado em suspensão para calcular o equivalente de areia. O ensaio é normalizado por: DNER-ME 054/97.

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização do ensaio por cada jornada de oito horas de trabalho.

2.3.3 Ensaios de misturas asfálticas

O bom desempenho do revestimento asfáltico depende, não só da seleção e controle dos materiais, como da correta usinagem. Complementar à inspeção dos materiais utilizados na produção da mistura asfáltica, são necessários ensaios após a usinagem para verificar se as características do projeto foram alcançadas

2.3.3.1 Determinação de Estabilidade e Fluência

O ensaio de Marshall pode ser realizado com o intuito de estudar as propriedades de estabilidade e fluência do material analisado. A estabilidade se refere à carga máxima indicativa da resistência do corpo de prova à compressão diametral confinada, enquanto a fluência se refere ao deslocamento máximo apresentado pelo corpo de prova correspondente à aplicação de carga máxima. O ensaio é normalizado por: DNER-ME 043/95.

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização do ensaio de Marshall em 03 corpos de prova para cada oito horas de trabalho.

2.3.3.2 Resistência à Tração

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, também conhecido como ensaio brasileiro, foi desenvolvido pelo Prof. Lobo Carneiro, na COPPE para cimento-concreto. O ensaio aplica compressão por meio de duas forças opostas e concentradas em um corpo de prova cilíndrico, gerando tensões de tração ao longo do diâmetro. O ensaio é normalizado por: DNER-ME 138/94.

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização de um ensaio de resistência à tração para cada oito horas de trabalho.

2.3.3.3 Teor de asfalto

O teor de asfalto, definido em projeto após o estudo de dosagem adequada, pode ser verificado por diferentes métodos, entretanto, a norma DNIT 031/2006 ES de concreto asfáltico recomenda o método que utiliza um extrator centrífugo denominado de rotarex, apresentado na norma DNER-ME 053/94. Esse método consegue extrair o ligante asfáltico após o aquecimento e centrifugação da amostra, com uso de solvente. Após esta técnica, o teor de asfalto é definido pela diferença entre as massas pesadas.

O método que utiliza o extrator Soxhlet, definido pela DNER-ME 158, também é muito utilizado para este fim.

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização do ensaio a cada 700m^2 de pista executada, sendo a amostra retirada após a passagem da acabadora.

2.3.3.4 Ensaio de Granulometria

O ensaio de granulometria deve ser repetido após a extração do asfalto da mistura asfáltica, seguindo a norma DNER-ME 083/98.

A norma DNIT 031/2006 prevê a realização de dois ensaios para cada silo quente, por cada jornada de oito horas de trabalho, além de um ensaio do material de enchimento (filer) por cada jornada de oito horas de trabalho.

2.3.4 Periodicidade de realização de ensaios

A Norma DNIT 031/2006 define a periodicidade dos ensaios que devem ser realizados para o controle adequado da execução de camadas asfálticas. A Tabela 2 apresenta um resumo dos ensaios e a periodicidade recomendada para misturas convencionais sem utilização de dope.

Tabela 2: Periodicidade de realização de ensaios

Material	Norma	Ensaio	Periodicidade
Agregado	DNER-ME 083/98	Granulometria do agregado de cada silo quente	Em cada jornada de 8 horas de trabalho
Agregado	-	Medida de temperatura do agregado, no silo quente da usina;	Medidas de temperatura durante a jornada de 8 horas de trabalho
Agregado Graúdo	DNER-ME 035/98	Desgaste Los Angeles	Em casos de dúvidas ou variações quanto à origem e natureza dos materiais
Agregado Graúdo	NBR 6954/1989 DNER-ME 086/94	Índice de forma	Em casos de dúvidas ou variações quanto à origem e natureza dos materiais
Agregado Miúdo	DNER-EM 367/97	Granulometria do fíler	Em cada jornada de 8 horas de trabalho
Agregado Miúdo	DNER-ME 054/97	Equivalente de areia do agregado miúdo	Em cada jornada de 8 horas de trabalho
Ligante Asfáltico	DNER-ME 003/99	Ensaio de penetração a 25ºC	Todo carregamento que chegar à obra
Ligante Asfáltico	NBR 11341/2004 DNER-ME 148/94	Ensaio de ponto de fulgor	Todo carregamento que chegar à obra
Ligante Asfáltico	DNER-ME 003 NBR 6560	índice de susceptibilidade térmica	Cada 100t de ligante
Ligante Asfáltico	NBR 14756/2001 NBR 15184	Viscosidade *Saybolt-Furol ou Brookfield*	Todo carregamento que chegar à obra
Ligante Asfáltico	NBR 14756/2001 NBR 15184	Viscosidade em diferentes temperaturas para curva viscosidade x temperatura	Cada 100t de ligante
Ligante Asfáltico	-	Medida de temperatura do ligante, na usina;	Medidas de temperatura durante a jornada de 8 horas de trabalho
Mistura asfáltica	-	Ensaio de espuma	Todo carregamento que chegar à obra
Mistura asfáltica	DNER-ME 078/94 DNER-ME 079/94	Características da mistura: adesividade	Em casos de dúvidas ou variações quanto à origem e natureza dos materiais
Mistura asfáltica	DNER-ME 043/95	Ensaio de estabilidade Marshall	Três corpos-de-prova de cada mistura por jornada de oito horas de trabalho

Material	Norma	Ensaio	Periodicidade
Mistura asfáltica	DNER-ME 138/94	Resistência à tração	Três corpos-de-prova de cada mistura por jornada de oito horas de trabalho
Mistura asfáltica	DNER-ME 053/94 DNER-ME 158/2011	Teor de ligante asfáltico	A cada 700m2 de pista.
Mistura asfáltica	DNER-ME 083/98	Granulometria da mistura de agregados	A cada 700m2 de pista.
Mistura asfáltica	-	Medida de temperatura da mistura, no momento da saída do misturador.	Medidas de temperatura durante a jornada de 8 horas de trabalho
Mistura asfáltica	DNIT-ES 031/2006	Grau de compactação	Determinações em locais escolhidos, aleatoriamente, durante a jornada de trabalho,

Fonte: Adaptado de DNIT-ES 031/2006

3 Análise de Ciclo de Vida

Diante da expectativa do mercado por soluções que demandem menos recursos físicos e econômicos, a ACV tem se apresentado como uma ferramenta útil para a tomada de decisões, uma vez que considera aspectos além dos custos financeiros (Farina *et al.*, 2017). Dessa forma, a ferramenta pode ser aplicada ainda na fase de projeto de pavimentos, mas também auxiliando na avaliação dos impactos ambientais produzidos em cada fase da vida útil da estrutura (AzariJafari *et al.*, 2016).

Os estudos de ACV devem ter como base a metodologia normalizada pelas ISO 14040 e ISO 14044. Normalmente a análise se dá em quatro etapas: definição do escopo e objetivo, análise do inventário, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados.

O estudo começa com a definição dos objetivos e escopo específicos. Após essa etapa, deve ser feita a principal tarefa da análise, que consiste no levantamento do inventário, responsável por compilar e quantificar os impactos ambientais relevantes de todo o ciclo de vida do produto ou processo. Em seguida, pode ser realizada a etapa de avaliação de impacto, que permite a comparação e análise dos resultados (Huang *et al.*, 2009). As etapas estão resumidas na Figura 2.

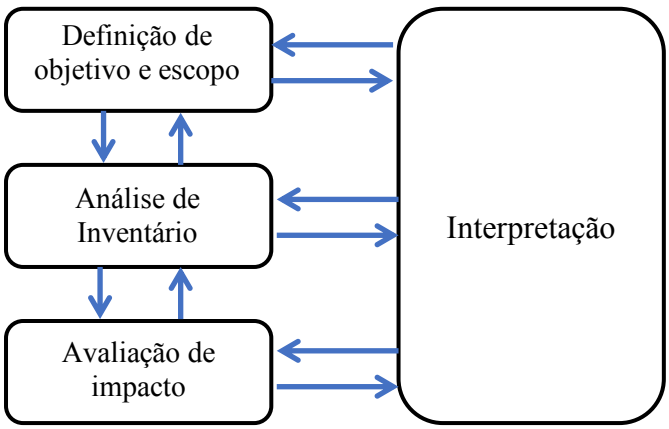


Figura 2: Estrutura básica de um ACV

Fonte: Adaptado da norma ISO 14040:2006

3.1 Etapas de estudo

A Análise de Ciclo de Vida pode ser empregada para o estudo de impactos ambientais de produtos e processos, adaptando a ferramenta às necessidades dos estudos. Dessa forma, as etapas podem variar dependendo do material e do escopo, sendo possível a inclusão de novas etapas conforme a necessidade de detalhamento. Da mesma forma, as análises podem focar em partes do ciclo de vida, considerando apenas etapas específicas, como construção e uso (H. Wang *et al.*, 2019).

Por concepção, no caso de projeto de rodovias, particularmente de pavimentação, um estudo de ACV pode incluir detalhadamente todas as etapas do pavimento, indo da extração de materiais até a demolição ou reciclagem da estrutura. Entretanto, em muitos casos, as limitações de dados e recursos impossibilitam esse rigor para analisar algumas estruturas, incluindo os pavimentos. Nesses, a definição de ACV, levada ao seu extremo rigor, não é possível de ser seguida, obrigando a relevar processos com o mínimo impacto no ciclo de vida e priorizando as maiores contribuições; ou seja, levando à estudos com simplificações de escopo, porém com objetivos alcançáveis (Santero *et al.*, 2011).

A ACV pode ser usada para determinar e minimizar o uso de recursos e o consumo energético, resultando na redução de emissões ao meio ambiente pelo melhor entendimento dos sistemas e suas inter-relações. A ACV também pode propor e analisar alternativas diferentes para cada etapa especifica do ciclo (Butt *et al.*, 2015).

Apesar da definição das etapas estudadas produzirem impactos relevantes nos resultados finais, não há um consenso definido na literatura para estudos de ACV de pavimentos, o que leva a uma grande quantidade de artigos que não abordam todas as etapas. A etapa mais frequente em artigos é a produção ou extração de materiais, enquanto o uso e o fim de ciclo, também tratado como reciclagem ou reconstrução, são as etapas menos bordadas e analisadas (Inyim *et al.*, 2016).

O projeto de pavimentos também pode ser considerado como uma etapa do ciclo de vida, prevista entre a produção de materiais e a construção do pavimento. O estudo deve abranger não só as emissões de forma pura, sendo necessário analisar os impactos por elas provocados através de indicadores pertinentes aos problemas (Inti *et al.*, 2016).

A etapa de congestionamento pode ser considerada à parte da etapa de uso, levando em consideração a operação da rodovia por meio de modelos matemáticos (Chen *et al.*, 2016). A incorporação de etapas pode ser feita conforme a necessidade de detalhamento, sempre atendendo ao escopo do estudo.

A Tabela 3 apresenta as fases consideradas em pesquisas publicadas que analisaram o ciclo de vida de pavimentos. Como é possível observar, as fases mais frequentes encontradas em pesquisas publicadas são: extração e produção de materiais, construção e manutenção do pavimento.

Tabela 3: Fases utilizadas em pesquisas de Análise de Ciclo de Vida

Primeiro Autor	Ano	Dimensionamento / projeto	Extração de Materiais	Produção de Materiais	Transporte	Construção	Uso	Manutenção	Fim de ciclo
Araújo, J. P. C.	2014		x	x		x	x	x	x
Aurangzeb, Q.	2014		x	x		x		x	
Batouli, M.	2017		x	x		x	x	x	
Bressi, S.	2019		x	x	x	x			
Butt, A. A.	2015		x	x	x	x		x	x
Celauro, C.	2016		x	x		x		x	
Chen, F.,	2016		x	x		x	x		x
Chiu, C.	2008		x	x				x	
Facanha, C	2007		x	x		x	x	x	x
Farina, A.	2017		x	x	x	x		x	
Giani, M. I.	2015		x	x	x	x	x	x	x
Gulotta, T. M.	2019		x	x	x	x		x	x
Häkkinen, T	1996		x	x		x	x	x	
Hasan, U.	2020		x	x	x	x		x	x
Horvath, A	1998		x	x		x			x
Inti, S.	2016	x	x	x		x			
Liu, X	2014		x	x		x	x	x	x
Loijos, A.	2005		x	x		x	x	x	x
Nisbet, M	2007		x	x		x		x	x
Mroueh, U.	2000		x	x		x		x	
Park, K.	2003		x	x		x		x	x

Primeiro Autor	Ano	Dimensionamento / projeto	Extração de Materiais	Produção de Materiais	Transporte	Construção	Uso	Manutenção	Fim de ciclo
Santos, J.	2017		x	x	x		x	x	
Santos, J.	2014		x	x	x	x		x	x
Spielmann, S.	2005		x	x		x	x	x	
Stripple, H.	2001		x	x		x	x	x	
Thenoux, G.	2007		x	x		x		x	x
Treloar, G.	2004		x	x		x	x	x	
Wang, H.	2019		x	x		x	x		
Wang, T.	2012		x	x		x	x	x	x
Yu, B.	2012		x	x		x	x		x
Zapata, P.	2005		x	x		x			
Zhang, H	2010a		x	x		x	x	x	x
Zhang, H.	2010b		x	x		x	x	x	x
	Total	1	33	33	8	31	17	26	18

3.2 Indicadores utilizados

A seleção de indicadores utilizados na análise proposta deve ser condizente com o escopo da pesquisa. Dessa forma, um número maior de indicadores não significa necessariamente em uma análise mais completa. Para esse fim, o ciclo de vida deve ser analisado sob a ótica de indicadores que quantifiquem aspectos diferentes.

Os resultados dos impactos ambientais mostram quais fases do ciclo de vida do pavimento são mais prejudiciais ao meio ambiente. Dessa forma, podem ser estabelecidas fases prioritárias do ciclo para o planejamento da obra e dimensionamento da estrutura de pavimentos, tendo em vista que produzirão resultados mais expressivos (Santos *et al.*, 2015).

A análise de impactos deve avaliar e classificar a significância das potenciais emissões ao meio ambiente de forma que as categorias utilizadas também sejam parte do escopo e objetivo da pesquisa, afetando outras fases da ACV. Podem ser utilizados diversos grupos para as análises de impactos ambientais, entretanto os impactos à saúde humana, à saúde ecológica e à depleção de recursos são as mais significantes. Dessa forma, há uma tendência da avaliação do consumo energético e da emissão de gases de efeito estufa em estudos de ACV de pavimentos (Inyim *et al.*, 2016).

Devido aos processos envolvidos para a produção e construção de revestimentos asfálticos, o uso de indicadores relacionados ao consumo energético e emissão de gases de efeito estufa deve ser incentivado. O aquecimento excessivo de agregados durante a usinagem da mistura asfáltica pode aumentar os impactos ambientais do material, de acordo com os indicadores utilizados (Aurangzeb *et al.*, 2014)

A ACV se mostra muito eficiente para identificar e quantificar os impactos ambientais na adoção de novos materiais empregados na construção de pavimentos. Também podem ser consideradas tecnologias novas, utilizando materiais conhecidos, como o processo de incorporação ou modificação do ligante por aditivos. Os estudos podem produzir diversos cenários para otimizar os processos (Bressi *et al.*, 2019)

A análise de impactos ambientais pode ser dividida em etapas menores: classificação, caracterização, normalização e balanceamento. Na primeira etapa, os resultados do inventário são designados a categorias de impactos relevantes. Como exemplo, pode-se citar a atribuição do dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e outras substâncias ao

grupo denominado pelo potencial de aquecimento global, do inglês Global Warming Potential (GWP). Por sua vez, o inventário classificado de acordo com cada impacto pode ser convertido em escala equivalente. Um exemplo dessa operação é a conversão de gases que contribuem para o aquecimento global (GWP) em dióxido de carbono equivalente ($CO_{2\ eq}$) (Inti *et al.*, 2016).

A Tabela 4 apresenta os indicadores utilizados nas pesquisas publicadas sobre análise de ciclo de vida de pavimentos. Como é possível notar, há uma preocupação maior em relação aos indicadores de emissões atmosféricas e ao consumo energético.

Tabela 4: Indicadores utilizados em pesquisas de Análise de Ciclo de Vida

Primeiro Autor	Ano	Consumo Energético	SO2	NOx	Gases de Efeito Estufa	CO2	Potencial de Aquecimento Global	Formação de matéria particulada	Outros
Araújo, J. P. C.	2014	x	x	x			x		
Aurangzeb, Q.	2014	x			x				
Batouli, M.	2017						x		
Bressi, S.	2019							x	Mudança Climática; Depleção: fóssil, água e ozônio; Acidificação do solo; Eutrofização: marinha e água potável; Toxidade humana; Ecotoxidade: marinha, do solo e água potável.
Butt, A. A.	2015	x			x				
Celauro, C.	2016	x	x	x			x		PM10; Hg; Pb; Geração de resíduo perigoso; Potencial de Toxicidade Humana (Câncer) - HTPc; Potencial de Toxicidade Humana (não Câncer) - HTPnc
Chen, F.,	2016	x	x				x		PM10
Chiu, C	2007	x							Poluente orgânico aquático; Uso de recursos
Facanha, C	2007		x	x		x			PM10; CO
Farina, A.	2017	x					x		

Primeiro Autor	Ano	Consumo Energético	SO2	NOx	Gases de Efeito Estufa	CO2	Potencial de Aquecimento Global	Formação de matéria particulada	Outros
Giani, M. I.	2015							x	Mudança Climática; Depleção: fóssil, água; metal e ozônio; Acidificação do solo; Eutrofização marinha; Toxidade Humana; Formação de oxidante fotoquímico; Radiação ionizante; Transformação da paisagem natural; Ocupação do solo: agrário e urbano; Ecotoxidade: marinha; solo e água potável
Gulotta, T. M.	2019	x					x		Acidificação potencial; Eutrofização potencial; Potencial Oxidação Fotoquímica - POCP
Häkkinen, T	1996	x	x	x		x		x	Ocupação do solo; Compostos orgânicos voláteis; Hidrocarbonetos; Metais pesados; Sal; Barulho
Hasan, U.	2020						x	x	Potencial de Toxicidade Humana (Câncer) - HTPc; Potencial de Toxicidade Humana (não Câncer) - HTPnc; Depleção de ozônio; Acidificação do solo; Eutrofização: marinha e água potável; Radiação ionizante; Ecotoxidade: água potável; marinha e do solo; Consumo d'água
Horvath, A	1998		x	x				x	H2SO4; Rejeito Perigoso
Inti, S.	2016		x	x		x	x		PM10; PM2,5; CH4; Compostos orgânicos voláteis
Liu, X	2014				x				

Primeiro Autor	Ano	Consumo Energético	SO2	NOx	Gases de Efeito Estufa	CO2	Potencial de Aquecimento Global	Formação de matéria particulada	Outros
Loijos, A	2005				x				
Mroueh et al.	2000	x	x	x		x		x	CO; Ocupação do solo; Compostos orgânicos voláteis; Barulho; Uso de recursos naturais; Efluentes ao solo: metais, Cl, CO4 e componentes orgânicos
Nisbet, M.	2007	x	x	x		x		x	CO; CH4
Park, K	2003	x	x	x		x			
Santos, J.	2017				x				
Santos, J.	2014				x				Demanda de energia acumulada; Acidificação do solo; Eutrofização do solo; Toxidade humana; Formação fotoquímica de ozônio
Spielmann, M	2004			x					Mudança Climática; Ocupação do solo; Hidrocarbonetos; Metais pesados; Poluente orgânico aquático
Stipple, H	2001		x	x		x			Uso de recursos naturais
Thenoux, G	2007	x							
Treloar, G. J.	2004	x							
Wang, H.	2019	x				x			CH4
Wang, T.	2012	x			x				
Yu, B.	2012	x	x	x	x				PM10; Compostos orgânicos voláteis

Primeiro Autor	Ano	Consumo Energético	SO2	NOx	Gases de Efeito Estufa	CO2	Potencial de Aquecimento Global	Formação de matéria particulada	Outros
Zapata, P	2005	x							
Zhang, H	2010a	x	x	x	x				PM2,5; CO; Compostos orgânicos voláteis; Poluente orgânico aquático; Hidrocarboneto não-metano; Amônia; Fosfato
Zhang, H	2010b	x			x				
	Total	20	13	13	10	8	7	6	

4 Referencial Teórico

Para a fase de coleta de dados, foram utilizadas as plataformas Web of Science e Scopus. As bases foram escolhidas por apresentarem grande quantidade de artigos publicados em periódicos.

A pesquisa foi feita utilizando as palavras chaves “LCA” (Life Cycle Analisys), “pavement” e “asphalt” em cada uma das plataformas. Foram encontrados 154 artigos na base Scopus e 114 na Web of Science, totalizando 268 artigos. A pesquisa levou em conta dados de entrada referentes aos artigos, como título, autor, data de publicação, periódico e palavras-chave.

A Figura 3 apresenta o processo da construção do banco de dados elaborado com os artigos encontrados. A primeira etapa consiste na busca por artigos científicos publicados em periódicos conceituados, disponíveis em bases confiáveis. A busca foi feita com palavras-chave relacionadas ao tema, porém sem restringir muito o tema para a obtenção de artigos que permitam traçar o panorama da área de pesquisa. Após o tratamento dos dados, as análises foram realizadas.

A união dos resultados encontrados nas bases de dados foi feita através software Mendeley, excluindo os resultados repetidos. Os dados provenientes de publicações em congressos, simpósios, conferências e capítulos de livros foram excluídos da amostra, pois fogem ao objetivo definido neste trabalho. Sendo assim, foram selecionados 153 artigos como banco de dados para as análises de publicações sobre o tema.

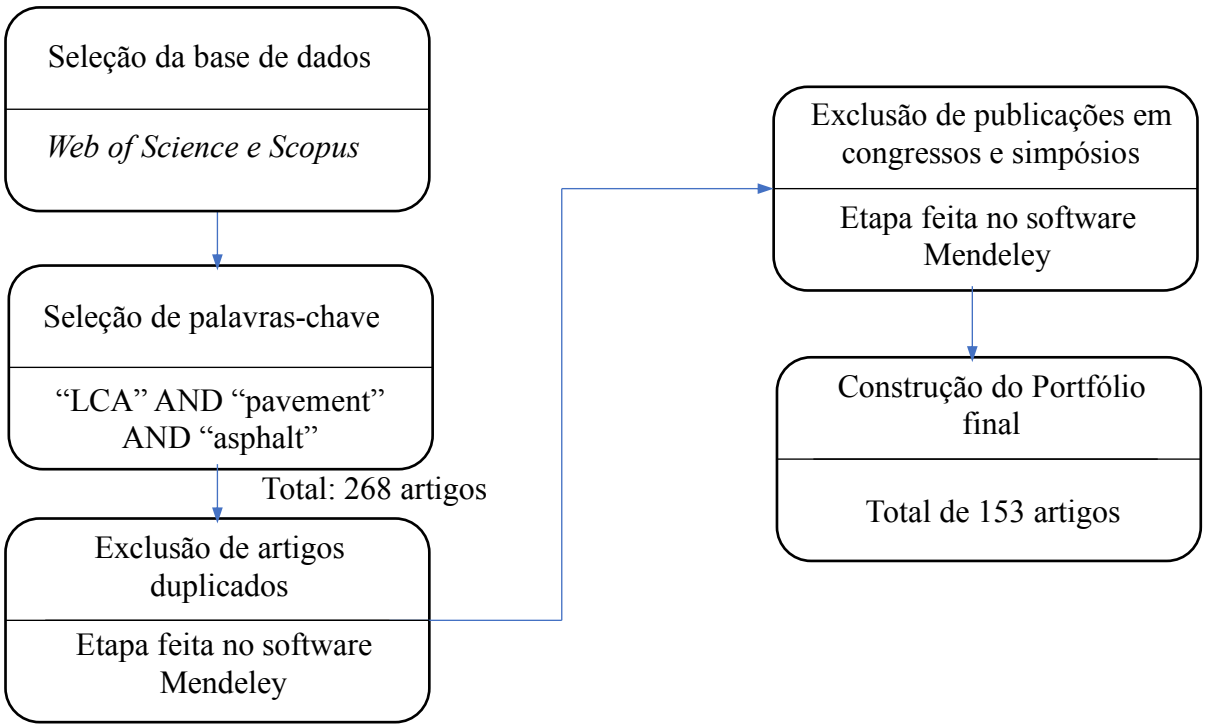


Figura 3: Fluxograma do processo de pesquisa de artigos
Fonte: Elaboração própria

4.1 Principais autores

A primeira análise do portfólio obtido se refere aos autores. Essa análise permite identificar a quantidade de pesquisadores envolvidos com o tema estudado, evidenciando a relevância do tema de acordo com os possíveis centros de pesquisa que utilizam a ACV para estudar as questões ambientais relacionadas aos pavimentos.

Os principais autores encontrados que publicaram sobre o tema abordado são apresentados na Figura 4 e na Tabela 5. A Figura 4 apresenta apenas os 15 autores que mais publicaram sobre o tema, dos 447 pesquisados. A Tabela 5 relaciona a quantidade de publicações com o número de autores, deixando evidente a frequência de publicação sobre o tema entre os pesquisadores encontrados.

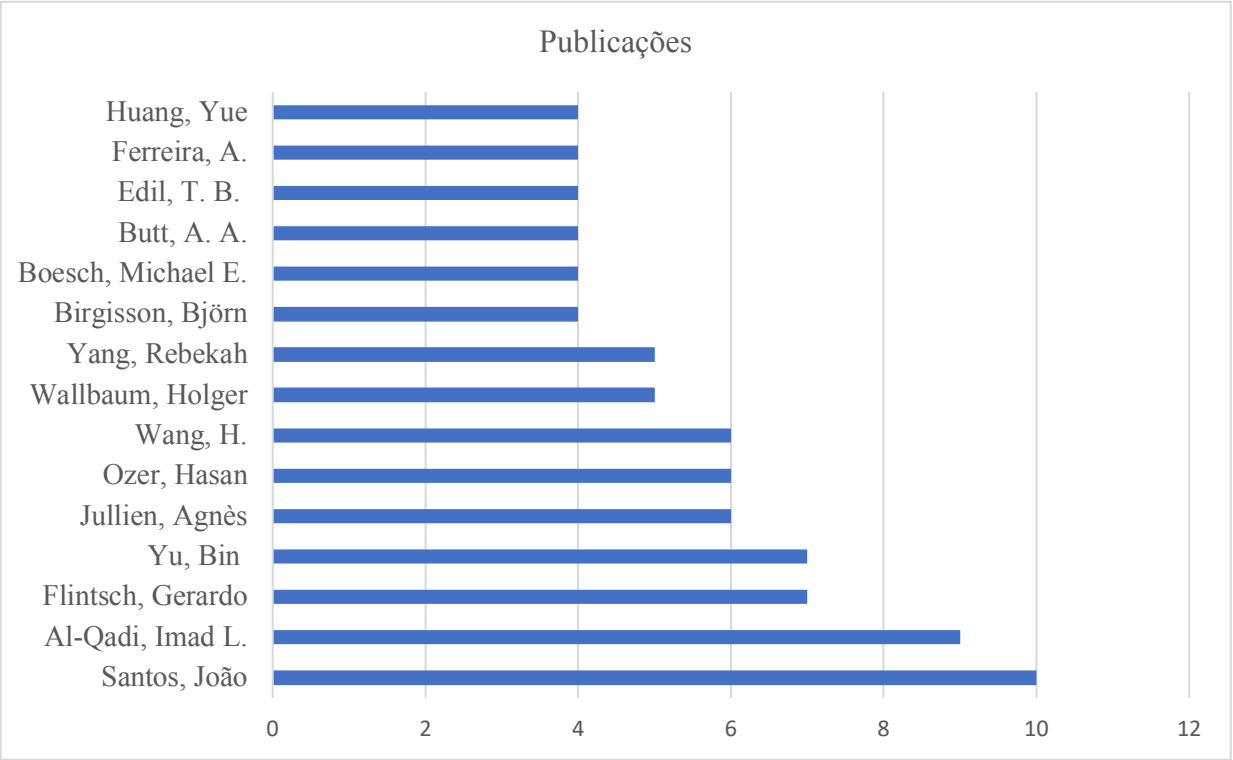


Figura 4: Número de publicações dos autores com maior número de artigos
Fonte: Elaboração própria

A Figura 4 faz um recorte da amostra total com os 5% dos autores com maior número de publicações. Com o gráfico elaborado, o pesquisador João Santos aparece como o único autor com 10 publicações, em seguida, apesar de menor número de publicações, mais autores são listados, chegando aos 5 últimos pesquisadores com 4 artigos.

A Tabela 5 apresenta a relação entre o número de artigos publicados pelos autores e a amostra total. Dos pesquisadores encontrados, apenas 3,4% possuem 4 ou mais publicações, indicando que o tema ainda está em desenvolvimento.

Tabela 5: Número de contribuições por autor

Número de Publicações	Número de Autores	% de autor
10	1	0,22%
9	1	0,22%
7	2	0,45%
6	3	0,67%
5	2	0,45%
4	6	1,34%
3	20	4,47%
2	45	10,07%
1	367	82,10%
Total	447	100,00%

Fonte: Elaboração própria

4.2 Principais Periódicos

Os periódicos das publicações encontradas foram levantados de forma que pudessem apresentar indicações sobre o foco abordado pelas pesquisas feitas sobre o tema. A Tabela 6 apresenta o nome do periódico e o número de artigos encontrados na busca. Com esses dados, também foi possível calcular a contribuição, em termos percentuais, do respectivo periódico em relação a amostra selecionada.

A Tabela 6 evidencia a tendência de publicação do tema em revistas relacionadas a estudos ambientais, considerando os dois primeiros periódicos e somando 29,6% das publicações levantadas. Além de apresentarem mais artigos, as revistas com foco ambiental geralmente possuem maior fator de impacto que as revistas focadas em pavimentação.

Tabela 6: Produtividade dos periódicos analisados

Periódico	**Número de publicações**	**%**	**% acumulada**	**Fator de impacto**
Journal of Cleaner Production	29	19,1%	19,1%	5,651
Resources, Conservation and Recycling	16	10,5%	29,6%	5,120
Transportation Research Part D: Transport and Environment	13	8,6%	38,2%	3,445
Transportation Research Record	12	7,9%	46,1%	0,695
The International Journal of Life Cycle Assessment	10	6,6%	52,6%	4,195
International Journal of Pavement Engineering	8	5,3%	57,9%	2,322
Road Materials and Pavement Design	5	3,3%	61,2%	2,199

Fonte: Elaboração própria

4.3 Evolução do número de artigos publicados ao longo dos anos

A Figura 5 ilustra o número de publicações encontradas por ano. Com esses dados, foi traçada uma média móvel como forma de minimizar as flutuações apresentadas a cada ano. O gráfico deixa evidente que há uma tendência de aumento das publicações sobre o tema com o passar dos anos.

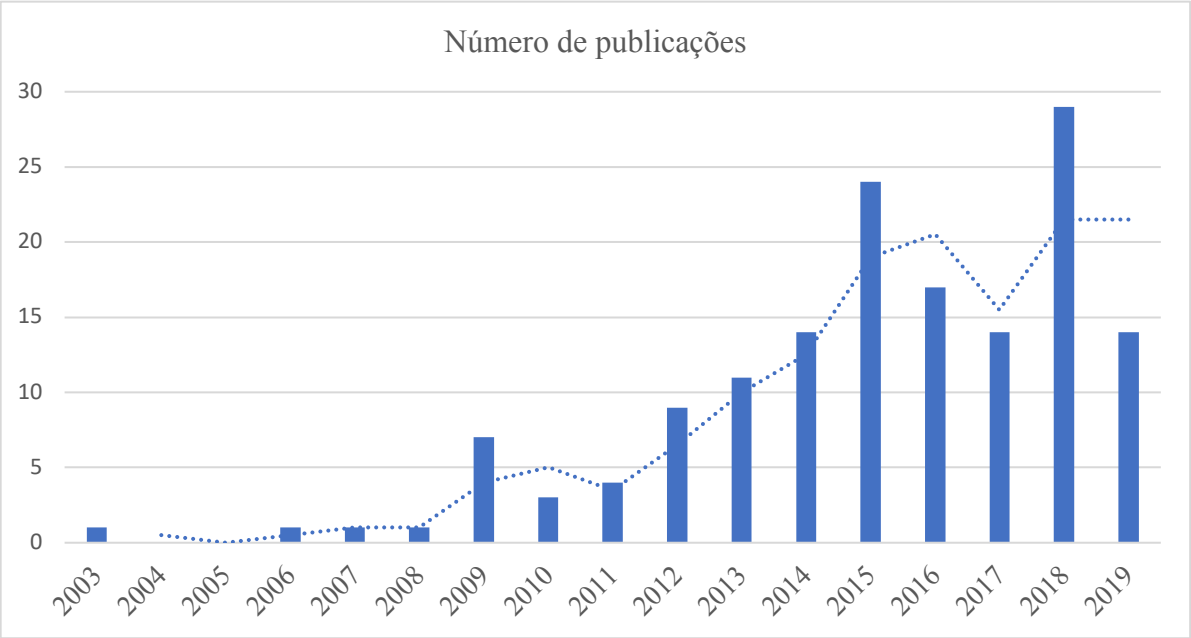


Figura 5: Número de publicações por ano
Fonte: Elaboração própria

4.4 Principais palavras-chave relacionadas ao tema

Foram levantadas as palavras-chave presentes nos artigos do banco de dados para estabelecer relações sobre o contexto em que a ACV de pavimentos estava sendo inserida nas publicações. O levantamento feito é apresentado na Tabela 7.

A análise dos resultados apresentados indica que há maior preocupação de analisar os impactos ambientais provocados pela utilização de materiais que podem substituir as misturas asfálticas convencionais em algumas situações, como é o caso do RAP, que recicla a mistura antiga; e das misturas mornas, muito utilizadas em reparos de pavimentos da malha urbana.

Outro fator importante é o aparecimento dos indicadores ambientais na lista de palavras-chave mais frequentes. Como relatado anteriormente, os indicadores mais utilizados em ACV de pavimentos consideram gases de efeito estufa, medidos em $CO_{2\ eq}$, e a energia requerida.

Tabela 7: Frequência de palavras-chave

Palavra-chave	Frequência
Life cycle assessment, LCA e Life cycle assessment (LCA)	32
Reclaimed asphalt pavement e Reclaimed asphalt pavement (RAP)	7
Warm mix asphalt	5
Pavement	4
Asphalt pavement	3
Energy consumption	3
Greenhouse gas	3
Hot mix asphalt	3

Fonte: Elaboração própria

5 Materiais e métodos

A pesquisa desenvolvida busca estudar os impactos produzidos pelo controle tecnológico no ciclo de vida de um pavimento flexível. Nesse caso, há a premissa inicial de que a execução da camada de revestimento em condições não indicadas por projeto pode encurtar sua vida útil, e consequentemente, aumentar os impactos ambientais.

A quantificação das emissões provocadas pelos pavimentos devido ao controle tecnológico inadequado na execução deve ser baseada na vida útil da estrutura, obtida por programas de simulação. A pesquisa pode ser resumida em três etapas principais: (i) Dimensionamento empírico-mecanístico dos pavimentos; (ii) Análise dos impactos nas fases de exploração, produção de materiais, construção e manutenção; (iii) Avaliação integrada entre desempenhos mecânicos e ambientais.

5.1 Dimensionamento

A primeira fase é constituída pelo dimensionamento do pavimento a partir das propriedades e características obtidas no projeto do pavimento, em que foi adotada a mistura resultante do projeto de dosagem. Com base na determinação do tráfego e nas características dos materiais disponíveis, são definidas as espessuras de cada camada da estrutura dos pavimentos, usualmente divididas em revestimento, base e sub-base

As espessuras das camadas e os materiais constituintes são utilizadas para o cálculo das emissões na fase de construção. Esse processo busca simular a realidade apresentada em campo, onde existe um projeto que, originalmente, atende as especificações técnicas e normas, porém a execução apresenta falhas. Nos casos em que ocorrem falhas na execução, provavelmente, os pavimentos em questão apresentarão defeitos precocemente.

5.1.1 Software MeDiNa

O software MeDiNa (v1.1.5.0, dezembro/2020, Brasil) pode ser utilizado para as simular a interação entre a estrutura do pavimento e o tráfego ao longo dos anos. O software, por meio de um método mecanístico-empírico, realiza a verificação do dimensionamento de estruturas de pavimentos, através de análise elástica de múltiplas camadas (AEMC). Atualmente há indicação de que o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) substituirá método empírico atualmente vigente no DNIT, evidenciando a tendência de utilização do software em obras rodoviárias nos próximos anos.

O programa foi desenvolvido utilizando as mesmas hipóteses para a solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos (Franco e Motta, 2020):

- os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos (a modelagem elástica não linear é feita por iterações elásticas lineares);
- a lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- as camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

Diante do exposto, as análises feitas com o *software* MeDiNa dependem das propriedades específicas dos materiais de cada camada. Outro fator determinante para as análises é a solicitação do tráfego, representada pelo número N.

5.2 Definição de cenários

Os cenários foram construídos considerando a variação de temperatura e energia de compactação como variáveis que formam pares, em relação à mistura de controle. Esses pares são compostos pela combinação de valores de temperatura e níveis de energia de compactação, resultando em condições distintas.

Apesar da mesma composição dos materiais de todos os cenários, cada par foi tratado como uma mistura diferente. Esse tratamento se dá em função das propriedades resultantes das misturas após o processo de compactação.

A mistura de controle das análises foi produzida utilizando a temperatura e energia de compactação definidas pelo projeto de dosagem da mistura asfáltica. Dessa forma, é possível estabelecer um parâmetro de comparação com os resultados e características das misturas executadas fora da especificação.

As quantidades de gases e energia, resultantes da construção da estrutura após o dimensionamento, são obtidas para cada cenário de estudo após a substituição da camada de revestimento pelas misturas de estudo. Após o cálculo das emissões até a fase de construção, pode ser realizada a avaliação do desempenho mecânico e estimativa da vida útil do pavimento de cada cenário por meio de softwares de análise de pavimentos. Essa etapa permite avaliar a necessidade de intervenções no pavimento diante da verificação e comparação com a vida útil estipulada no início do projeto.

Quando isso acontece, a etapa de manutenção produz novas emissões pelos serviços executados e pela substituição de materiais existentes na estrutura do pavimento. O cálculo dessas emissões pode ser feito de forma análoga ao cálculo realizado após o dimensionamento do pavimento, levando em consideração as espessuras das novas camadas.

Os volumes necessários para a construção da estrutura do pavimento podem ser obtidos de acordo com a espessura da camada e a especificação do material projetado. Essas informações formam a base do cálculo de insumos que compõem cada elemento da estrutura.

Vale ressaltar que o consumo energético e a utilização de insumos calculados são considerados em três etapas do ciclo de vida dos pavimentos: (i) Exploração dos insumos naturais; (ii) usinagem e (iii) construção.

Após todas as simulações e levantamento de emissões ao longo do ciclo de vida, a análise pode proceder para uma etapa de síntese, considerando os indicadores e a vida útil do pavimento. Para verificar os danos ambientais provocados pelo pavimento, foram utilizados os valores de CO_2, CH_4, N_2O e GER (Energia bruta requerida), de acordo com o que foi sugerido pela revisão feita no estudo.

As emissões atmosféricas podem ainda ser agrupadas na forma de gases de efeito estufa, quantificados em forma de $CO_{2\ \text{equivalente}}$. A Tabela 8 apresenta os coeficientes utilizados para as análises ambientais em termos de gases de efeito estufa ($CO_{2\ eq}$).

Tabela 8: Contribuição relativa de cada substância para incremento de Gases de Efeito Estufa

		Gases de Efeito Estufa	
Substância	**Vida útil**	**Efeito cumulativo (20 anos)**	**Efeito cumulativo (100 anos)**
$\mathbf{CO_2}$	indeterminado	1	1
$\mathbf{CH_4}$	12,4	84	28
$\mathbf{N_2O}$	121,0	264	265
$\mathbf{CF_4}$	50.000,0	4880	6680

Fonte: adaptado de (IPCC, 2014)

A Figura 6 apresenta o fluxograma do processo realizado na pesquisa para a elaboração e análise dos cenários.

Figura 6: Fluxograma do procedimento metodológico
Fonte: Elaboração própria

5.3 Cálculo de emissões

De acordo com o método explicitado, o cálculos de emissões ao longo do ciclo de vida do pavimento pode ser realizado para cada etapa mencionada anteriormente. As quantidades de cada material dependem da composição utilizada de cada camada. O Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), disponibilizado pelo DNIT, oferece uma base detalhada dos materiais utilizados para a construção de rodovias.

As equações utilizadas para cada fase são apresentadas a seguir:

- Extração e produção de materiais

$$E_c = \sum Q_m \times E_m \times f_{ton} \times e \qquad (1)$$

Sendo:

E_c – Emissões provenientes da extração e produção de materiais para a construção de uma camada;
Q_m – Quantidade do material utilizado na camada;
E_m – Emissões específicas do material utilizado na camada (kg/t ou MJ/t);
f_{ton} – Fator de conversão de Q_m para toneladas;
e – Espessura da camada.

- Fase de construção

$$E_e = C_e \times E_{comb.} \qquad (2)$$

$$C_e = \sum C_c \times P \times U_o \times f_u \times f_{ton} \times e \qquad (3)$$

Sendo:

E_e – Emissões provenientes da utilização dos equipamentos para a construção de uma camada;
C_e – Consumo do equipamento (l/m^3)
$E_{comb.}$ – Emissões específicas do combustível (kg/l ou MJ/t);
C_c – Coeficiente de combustível (l/kWh);

P – Potência (kW);

U_o – Utilização Operativa;

f_u – Fator de usinagem;

f_{ton} – Fator de conversão de Q_m para toneladas;

e – Espessura da camada.

- Fase de manutenção

$$E_{manut.} = E_c + E_e \tag{4}$$

$$E_{manut.} = (\sum Q_m \times E_m \times f_{ton} \times e) + (E_{comb} \times \sum C_c \times P \times U_o \times f_u \times f_{ton} \times e) \tag{5}$$

Sendo:

$E_{manut.}$ – Emissões provenientes da fase de manutenção;

E_c – Emissões provenientes da extração e produção de materiais para a construção de uma camada;

Q_m – Quantidade do material utilizado na camada;

E_m – Emissões específicas do material utilizado na camada (kg/t ou MJ/t);

f_{ton} – Fator de conversão de Q_m para toneladas;

e – Espessura da camada;

E_e – Emissões provenientes da utilização dos equipamentos para a construção de uma camada;

C_e – Consumo do equipamento (l/m^3)

$E_{comb.}$ – Emissões específicas do combustível (kg/l ou MJ/t);

C_c – Coeficiente de combustível (l/kWh);

P – Potência (kW);

U_o – Utilização Operativa;

f_u – Fator de usinagem;

f_{ton} – Fator de conversão de Q_m para toneladas;

- Emissão total

$$Emiss\tilde{a}o\ total = (E_c + E_e) + E_{manut.} \quad (6)$$

Sendo:

$E_{manut.}$ – Emissões provenientes da fase de manutenção;

E_c – Emissões provenientes da extração e produção de materiais para a construção de uma camada;

E_e – Emissões provenientes da utilização dos equipamentos para a construção de uma camada;

6 Estudo de caso

O estudo de caso se concentra na premissa de que há ausência ou controle tecnológico inadequado durante a fase de construção, considerando que o projeto de dosagem da mistura utilizada esteja correto. Para fins de dimensionamento do pavimento, foi considerada uma mistura asfáltica de controle, de acordo com o procedimento detalhado no Capítulo Materiais e métodos.

6.1 Coleta de dados

A construção do estudo de caso foi realizada com base na pesquisa de Albuquerque (2005), que analisou a influência da energia e da temperatura de compactação nos parâmetros volumétricos e nas propriedades mecânicas dos concretos asfálticos. A pesquisa mostra que os parâmetros volumétricos das misturas sofrem influência da temperatura e energia de compactação, porém as propriedades mecânicas são ainda mais suscetíveis à alteração dessas condições.

As misturas estudadas apresentaram variação do Grau de Compactação (GC), com redução suficiente para atender ao valor mínimo de 97% especificado por norma, exceto a mistura compactada com 30 golpes e temperatura de 90ºC, com 96%. Quanto às propriedades mecânicas, houve variação de 76% para a resistência a tração e 118% para o módulo de resiliência.

A mistura de controle foi obtida através do projeto de dosagem feito pelo método Marshall, que resultou na mistura com o maior valor do módulo de resiliência. Essa foi a mistura considerada para o dimensionamento e como referência para as análises.

Após a dosagem, foram feitas variações de temperatura e energia de compactação para simular os efeitos do controle tecnológico inadequado durante a execução do pavimento. A definição dos cenários foi feita utilizando materiais de mesma origem em todas as misturas, de forma que as propriedades dos elementos que constituem as diferentes misturas fossem as mesmas.

6.2 Cenários de análise

Os cenários foram definidos a partir de três temperaturas (90ºC, 140ºC e 160ºC) e três energias de compactação, medidas pelo número de golpes por face do corpo-de-prova (30, 60 e 90 golpes) provenientes do estudo de Albuquerque (2005), resultando em nove pares. A mistura de controle do estudo apresenta a temperatura de compactação de 140ºC e a energia de compactação de 60 golpes por face como parâmetros de referência. A Tabela 9 apresenta os cenários utilizados nas análises

Tabela 9: Cenários utilizados no estudo de caso

Cenários	Energia de compactação	Temperatura	Espessura do revestimento (cm)
CBUQ_30golpes_90ºC	30	90	10
CBUQ_30golpes_140ºC	30	140	10
CBUQ_30golpes_160ºC	30	160	10
CBUQ_60golpes_90ºC	60	90	10
CBUQ_60golpes_140ºC	60	140	10
CBUQ_60golpes_160ºC	60	160	10
CBUQ_90golpes_90ºC	90	90	10
CBUQ_90golpes_140ºC	90	140	10
CBUQ_90golpes_160ºC	90	160	10

Fonte: Elaboração própria

Os cenários definidos apresentam a variação de energia e temperatura entre os pares de forma que seja possível analisar todas as possibilidades que acontecem em campo durante a execução do revestimento asfáltico. A Tabela 10 apresenta os parâmetros volumétricos das misturas produzidas por Albuquerque (2005), enquanto a Tabela 11 resume as características mecânicas do cenários.

Tabela 10: Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas

Energia de Compactação (Golpes)	**Temperatura de Compactação (°C)**	**Densidade Aparente**			**% Vazios**			**Grau de Compactação (%)**		
		Média	s	Coeficiente de Variação%	Média	s	Coeficiente de Variação%	Média (%)	s	Coeficiente de Variação%
30	90	2,331	0,015	0,64	6,236	0,600	9,63	97,1	0,622	0,64
	140	2,370	0,007	0,32	4,658	0,300	6,45	98,7	0,311	0,32
	160	2,376	0,005	0,22	4,422	0,209	4,72	99,0	0,216	0,22
60	90	2,360	0,013	0,54	5,065	0,511	10,09	98,3	0,529	0,54
	140	2,400	0,011	0,47	3,442	0,456	13,25	100,0	0,472	0,47
	160	2,407	0,006	0,26	3,180	0,256	8,05	100,3	0,265	0,26
90	90	2,364	0,013	0,56	4,899	0,531	10,83	98,5	0,550	0,56
	140	2,419	0,005	0,22	2,692	0,210	7,82	100,8	0,218	0,22
	160	2,427	0,006	0,26	2,355	0,250	10,61	101,1	0,259	0,26

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2005)

Tabela 11: Características das misturas asfálticas utilizadas

Energia de Compactação (Golpes)	Temperatura de Compactação (°C)	Resistência a Tração (MPa)	Módulo de Resiliência		Curva de fadiga: N_{fad}= K1 (1/Δσ)^n1		
		RT (MPa)	MR (MPa)	s (MPa)	K1	n1	R1^2
30	90	0,76	2817	203	675,5	2,34	0,99
	140	1,03	4647	295	1490,3	2,23	0,99
	160	1,06	4664	287	1471,4	2,36	0,97
60	90	1,10	5021	727	1023,4	2,09	0,99
	140	1,34	6129	250	2800	2,55	0,99
	160	1,29	5222	209	2641,6	2,58	0,99
90	90	0,91	4391	243	1158,3	2,25	0,97
	140	1,29	5140	378	3110,3	2,68	0,99
	160	1,28	5442	991	3368,1	2,82	0,99

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2005)

O software MeDiNa (v1.1.5.0, dezembro/2020, Brasil) foi utilizado para o dimensionamento do pavimento estudado. Apesar da recomendação do manual de pavimentação (DNIT, 2006), a espessura de 7,5 cm não foi suficiente para o tráfego, o que levou ao aumento da espessura dessa camada para 10,0 cm. A mistura padrão, compactada a 140°C e com 60 golpes por face, foi utilizada como o material do revestimento. Os materiais de base e sub-base empregados estão contidos no banco de dados original do software. O dimensionamento foi realizado utilizando o tráfego e as propriedades dos materiais como *inputs.*

O tráfego é usualmente definido em termos de repetições de um eixo padrão de 8,2 tf. Para o dimensionamento foi utilizado o valor de $N = 5{,}0 \times 10^6$. Como unidade funcional das analises ambientais, foi considerada a construção, por metro linear, da seção de uma rodovia com duas faixas de rolamento de 3,6 metros cada e sem acostamento, totalizando 7,2 metros. Dessa forma, a estrutura da ACV pode ser resumida como:

- Limites do sistema analisado: Estrutura do pavimento composta por base e sub-base granulares e revestimento de mistura asfáltica. Uma faixa de rolamento, de 3,6 metros, em cada sentido sem acostamentos;
- Inventário: Banco de dados Ecoinvent®, através do software SimaPro®;
- Análise de resultados: tCo_{2eq}/m/Número N.

A Tabela 12 apresenta o resumo das propriedades dos materiais inseridas no software.

Tabela 12: Estrutura do pavimento (dimensionamento)

Camada	Material	Espessura (cm)	Massa Específica (g/cm^3)	Módulo de Resiliência (Mpa)
Revestimento	CBUQ	10	2,4	6129
Base	BGS	15	2,223	381
Sub-base	Solo laterítico areno-argiloso	15	1,800	265

Fonte: Elaboração própria

A Figura 7 apresenta o resultado do dimensionamento realizado com o software MeDiNa.

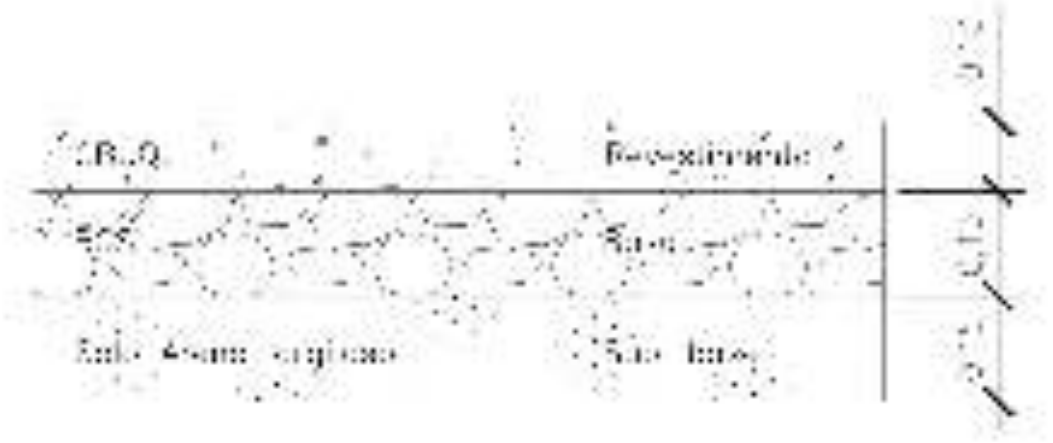


Figura 7: Estrutura do pavimento
Fonte: Elaboração própria

A partir do dimensionamento, a camada de revestimento foi substituída pelas misturas dos cenários elaborados. A troca dos materiais do revestimento permite estimar a vida útil do pavimento que foi dimensionado com os parâmetros de projeto, porém foi executado sem o controle tecnológico necessário.

A Tabela 13 apresenta a estimativa da vida útil dos pavimentos em termos de Número N. O fim da vida útil do pavimento, do ponto de vista estrutural, foi definido a partir do parâmetro de área trincada como 30%. Dessa forma, fica evidente quais cenários não atingem a durabilidade necessária para atendimento do projeto.

Tabela 13: Vida útil dos cenários após dimensionamento

Cenários	Energia de compactação	Temperatura	Vida útil (Número N)
CBUQ_30golpes_90ºC	30	90	4,56E+06
CBUQ_30golpes_140ºC	30	140	5,53E+06
CBUQ_30golpes_160ºC	30	160	4,94E+06
CBUQ_60golpes_90ºC	60	90	3,65E+09
CBUQ_60golpes_140ºC	60	140	5,15E+06
CBUQ_60golpes_160ºC	60	160	5,27E+06
CBUQ_90golpes_90ºC	90	90	4,99E+06
CBUQ_90golpes_140ºC	90	140	5,41E+06
CBUQ_90golpes_160ºC	90	160	4,91E+06

Fonte: Elaboração própria

A análise da Tabela 13 indica que quatro cenários têm durabilidade inadequada para o estudo de caso, necessitando de alguma intervenção ao longo da vida útil. Os cálculos

dos impactos provocados nesses cenários até fase de construção podem ser conduzidos normalmente, com a ressalva de que futuramente haverá uma modificação em alguma parte da estrutura.

Outro aspecto importante é a vida útil encontrada para o cenário CBUQ_60golpes_90º. O resultado da análise indica que foi encontrado um *outlier*, provavelmente proveniente dos dados encontrados em Albuquerque (2005). A análise não pôde continuar devido a limitações do software, com indicação de que o pavimento estava longe do fim da vida útil. Dessa forma, esse cenário não será considerado nas discussões de resultados.

Os impactos ambientais foram calculados a partir das equações apresentadas e do software Simapro® e do banco de dados Ecoinvent®, além dos trabalhos de Stripple (2001) e Nascimento *et al.* (2020). A Tabela 14 apresenta o resumo das emissões de gases de efeito estufa levantados e do consumo de energia relacionados à produção dos materiais utilizados na construção dos pavimentos.

Tabela 14: Emissões de gases de efeito estufa e quantidade de energia relacionadas à produção dos insumos

Insumo	QE (MJ/t)	CO_2 (t/t)	N_2O (kg/t)	CH_4 (kg/t)
Óleo combustível 1A	0,1	4,31E+02	9,35E-03	1,57E+00
Cimento asfáltico	682	3,99E+02	2,73E-03	1,71E-01
Cimento Portland CP II - 32 a granel	5161	9,04E+02	5,23E-03	6,75E-01
Areia média	96	1,13E+01	3,31E-04	1,46E-02
Cal hidratada	5161	9,53E+02	7,01E-03	2,73E-01
Brita	96	1,69E+01	5,25E-04	3,05E-02
Consumo de Óleo Diesel	42087	4,95E+02	9,34E-03	1,59E+00

Fonte: Nascimento et al. (2020)

Com os dados da Tabela 14 e as composições dos materiais utilizadas em cada camada, verificadas na base de dados SICRO (DNIT, 2021), foram obtidos os resultados da fase de extração e produção de materiais e construção do pavimento. As TabelasTabela *16*,Tabela *17*, Tabela *18*, Tabela *19* eTabela *20* apresentam as composições obtidas no SICRO para os cálculos realizados.

O consumo de óleo diesel foi feito a partir das informações encontradas nas composições e no coeficiente de combustível apresentado no Volume 03 do Manual de custos de infraestrutura de transportes (DNIT, 2017).

Tabela 15: Coeficiente de combustível de equipamentos – construção

Equipamento	Coeficiente de combustível (l/kWh)	Tipo de combustível
Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	0,34	Diesel
Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	0,18	Diesel
Carregadeira de pneus com capacidade de 1,53 m3 - 106 kW	0,18	Diesel
Carregadeira de pneus com capacidade de 3,3 m3 - 213 kW	0,18	Diesel
Distribuidor de agregados autopropelido - 130 kW	0,18	Diesel
Grupo gerador - 100/110 kVA	0,18	Diesel
Grupo gerador - 456 kVA	0,18	Diesel
Motoniveladora - 93 kW	0,18	Diesel
Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	0,18	Diesel
Rolo compactador liso autopropelido vibratório de 11 t - 97 kW	0,18	Diesel
Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	-	-
Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	-	Elétrico
Usina misturadora de solos com capacidade de 300 t/h	-	Elétrico
Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	0,18	Diesel

Fonte: Adaptado de DNIT (2017)

Tabela 16: Composição da construção da sub-base

CGCYT DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO — Rio de Janeiro — FIC [illegible]

Custo Unitário de Referência — Outubro/2019 — Produção da equipe [illegible] m³

[illegible] Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida — Valores em reais (R$)

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização Operativa	Utilização Improdutiva	Custo Horário Produtivo	Custo Horário Improdutivo	Custo Horário Total
[illegible] Caminhão tanque com capacidade de [illegible] - 188 kW	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible] Grade de 24 discos rebocável de 24"	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible] Motoniveladora - 93 kW	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible] Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 80 kW	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible] Rolo compactador pé-de-carneiro vibratório autopropelido de 11 t - 82 kW	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible] Trator agrícola - 77 kW	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
				Custo horário total de equipamentos		[illegible]

B - MÃO-DE-OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total
[illegible] Ferramenta	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
			Custo horário total de mão-de-obra	[illegible]
			Custo horário total de execução	[illegible]
			Custo unitário de execução	[illegible]
			Custo de PIS	[illegible]
			Custo do FIT	-

C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário
			Custo unitário total de material	

D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
[illegible] Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica	[illegible]	m³	[illegible]	[illegible]
			Custo total de atividades auxiliares	[illegible]
			Subtotal	[illegible]

E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
[illegible] Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m³	[illegible]	[illegible]	h	[illegible]	[illegible]
				Custo unitário total de tempo fixo	[illegible]

F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT LN	DMT RP	DMT P	Custo Unitário
[illegible] Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m³	[illegible]	tkm	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
				Custo unitário total de transporte		
				Custo unitário direto total		[illegible]

Fonte: DNIT(2021)

Tabela 17: Composição da usinagem da BGS

Fonte: DNIT(2021)

Tabela 18: Composição da construção da BGS

CGCIT — DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO

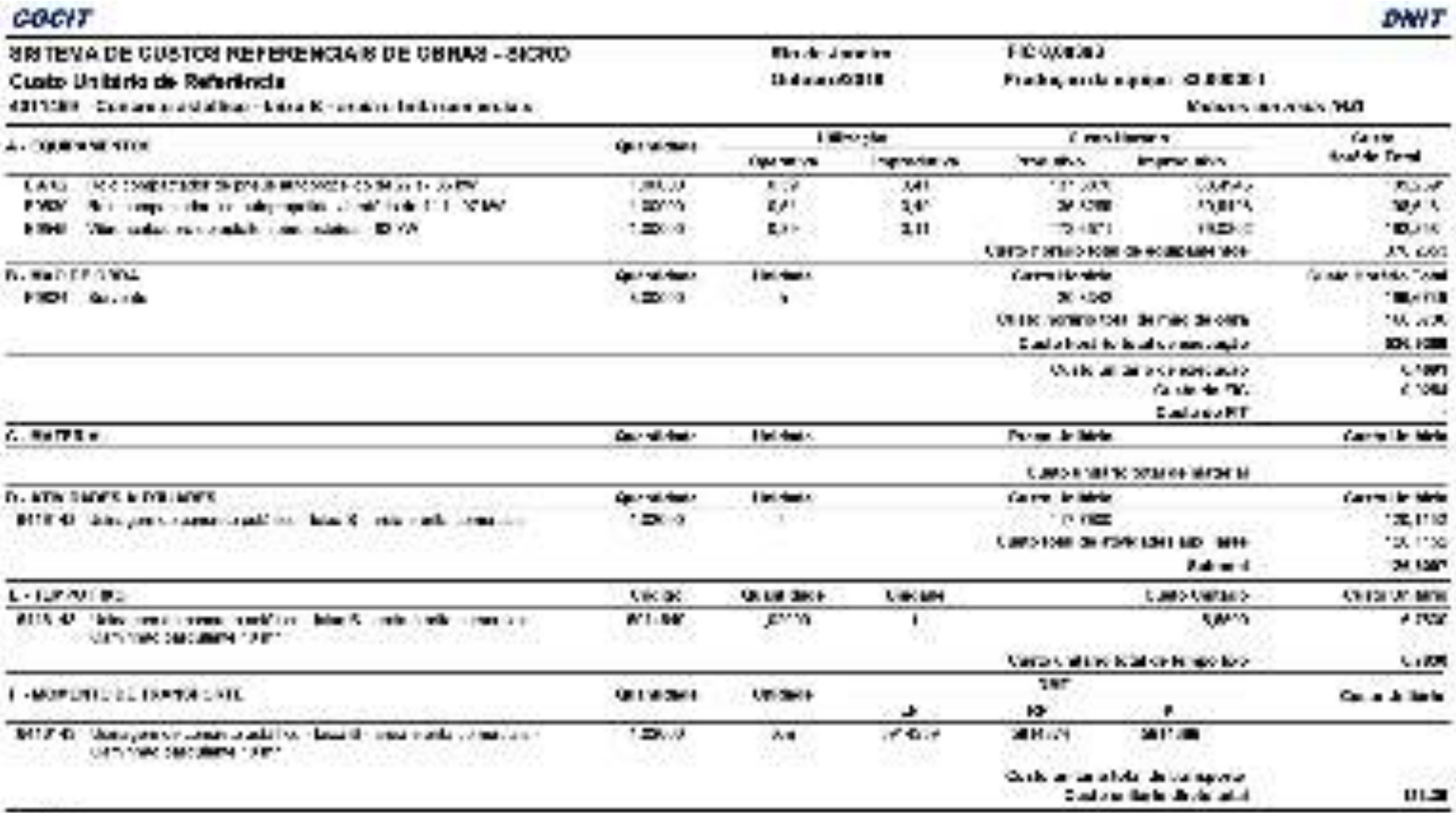
Custo Unitário de Referência

40112[illegible] Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade
[illegible]	[illegible]	[illegible]
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade
[illegible]	[illegible]	[illegible]
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade
[illegible]	[illegible]	[illegible]
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade
[illegible]	[illegible]	[illegible]

Fonte: DNIT(2021)

Tabela 19: Composição da construção de revestimento asfáltico



Fonte: DNIT(2021)

Tabela 20: Composição da usinagem de revestimento asfáltico

CGCIT | DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO | Rio de Janeiro
Custo Unitário de Referência | Outubro/2019 | Produção da equipe [illegible]
[illegible] Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais | Valores em reais (R$)

A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização Operativa	Utilização Improdutiva	Custo Horário Produtivo	Custo Horário Improdutivo	Custo Horário Total
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
					Custo horário total de equipamentos		[illegible]

B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
				Custo horário total de mão de obra	[illegible]
				Custo horário total de execução	[illegible]
				Custo unitário de execução	[illegible]
				[illegible]	[illegible]
				[illegible]	

C - MATERIAL		Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
				Custo unitário total de material	[illegible]

D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
			Custo total de atividades auxiliares	
			Subtotal	[illegible]

E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
					Custo unitário total de tempo fixo	[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	DNIT			[illegible]
			[illegible]	[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
			[illegible]			[illegible]

Fonte: DNIT(2021)

Após os cálculos das emissões provocadas ate a etapa de construção, foram analisados os cenários com vida útil menor que $N = 5{,}0 \times 10^6$. Dessa forma, os cenários que atingiram 30% de área trincada necessitam manutenção, que foram estipuladas para acontecerem logo após a construção.

A otimização da técnica de manutenção foge ao escopo do projeto, de forma que foi definida apenas um tipo de intervenção para todos os cenários. A definição do tempo de projeto mais econômico para a reabilitação do pavimento, seja por economia operacional ou de insumos, não foram estudadas na pesquisa.

A análise da vida útil após a manutenção dos cenários também foi feita pelo software MeDiNA (v1.1.5.0, dezembro/2020, Brasil). A intervenção foi feita de modo que atingisse o critério de durabilidade estipulado no início do projeto, ou seja, $N = 5{,}0 \times 10^6$.

Diante do exposto, foi proposta a solução de reforço, com fresagem de 7 cm da camada de revestimento e recomposição de 10 cm. A mistura padrão, compactada a 140°C e com 60 golpes por face, foi utilizada como material de recomposição da modelagem de análise.

A Tabela 21 apresenta a vida útil dos cenários de estudo resultantes das análises após as manutenções propostas

Tabela 21: Vida útil dos cenários após a manutenção

Cenário	Energia de compactação	Temperatura de compactação	Vida útil (Número N)
CBUQ_30golpes_90ºC	30	90	5,08E+06
CBUQ_30golpes_140ºC	30	140	5,53E+06
CBUQ_30golpes_160ºC	30	160	5,11E+06
CBUQ_60golpes_90ºC	60	90	3,65E+09
CBUQ_60golpes_140ºC	60	140	5,15E+06
CBUQ_60golpes_160ºC	60	160	5,27E+06
CBUQ_90golpes_90ºC	90	90	5,10E+06
CBUQ_90golpes_140ºC	90	140	5,41E+06
CBUQ_90golpes_160ºC	90	160	5,12E+06

Fonte: Elaboração própria

O cálculo das emissões da etapa de manutenção é feito de forma análoga ao cálculo feito após até a construção. Por se tratar da manutenção da estrutura depois de construída, o

cálculo prévio da construção permanece o mesmo, e é acrescida a parcela referente da nova etapa.

Como as camadas de base e sub-base continuam inalteradas, as composições utilizadas envolvem apenas a camada do revestimento. A Tabela 23 apresenta a composição do serviço de fresagem. Os demais serviços foram os mesmos utilizados na etapa de construção.

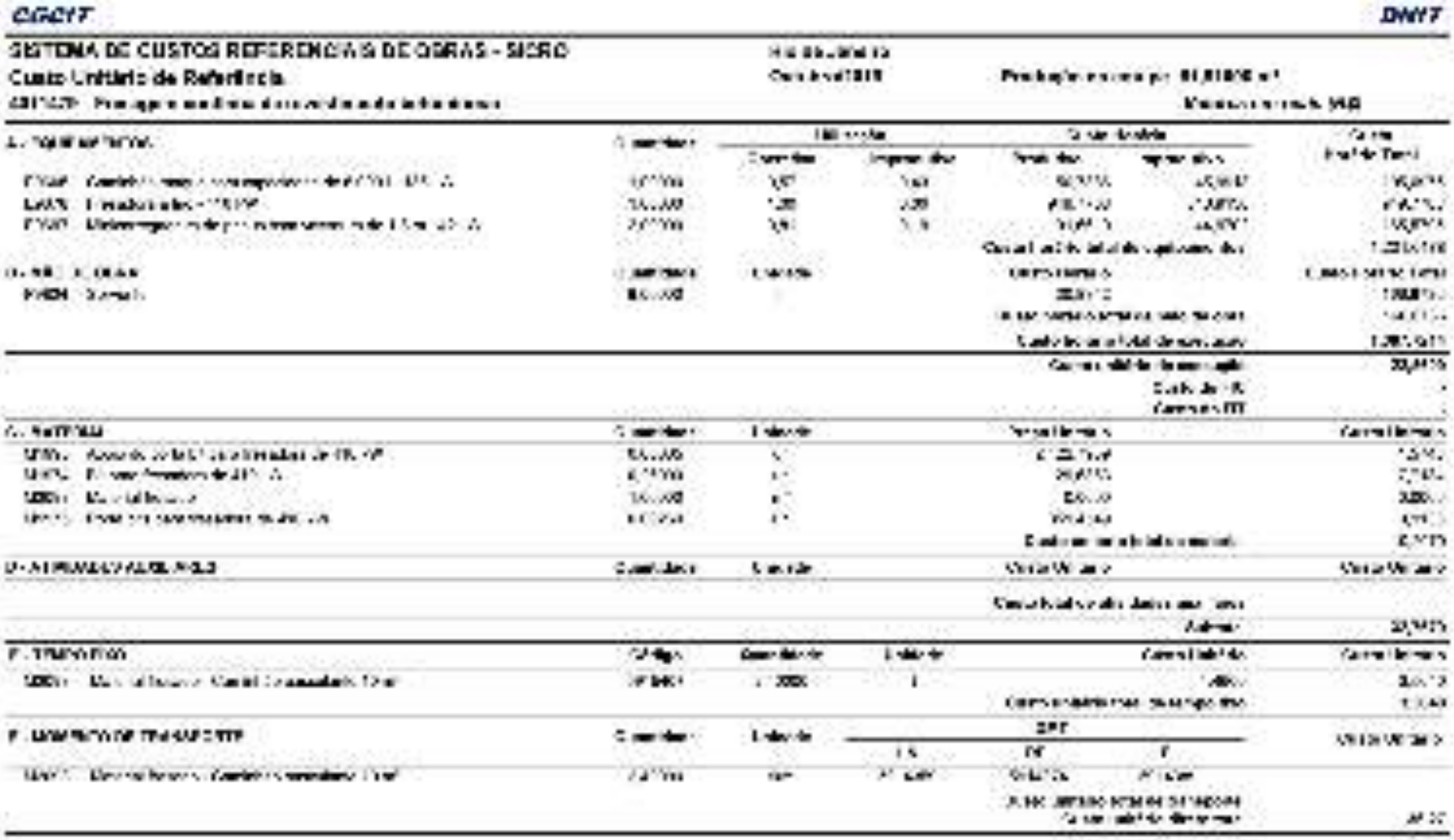
O consumo de óleo diesel, apresentado na Tabela 22, foi feito a partir das informações encontradas nas composições e no coeficiente de combustível apresentado no Volume 03 do Manual de custos de infraestrutura de transportes (DNIT, 2017).

Tabela 22: Coeficiente de combustível - manutenção

Equipamento	**Coeficiente combustivel (l/kWh)**	**Tipo de combustível**
Caminhão tanque com capacidade de 6.000 l - 136 kW	0,18	Diesel
Fresadora a frio - 410 kW	0,18	Diesel
Minicarregadeira de pneus com vassoura de 1,8 m - 42 kW	0,18	Diesel

Fonte: Adaptado de DNIT (2017)

Tabela 23: Composição da fresagem de revestimento asfáltico



Fonte: DNIT(2021)

7 Discussão e resultados

Como detalhado no capítulo do Estudo de caso, o levantamento dos indicadores ambientais relativos a cada cenário foi feito após o dimensionamento e análise mecanística do pavimento como um todo. Esse processo permitiu não só o dimensionamento, como a verificação da durabilidade das estruturas.

Como é possível notar pela Tabela 13 e Tabela 21, os cenários possuem vida útil diferente entre si. Essa diferença se deve as características das misturas asfálticas, considerando que as camadas de base e sub-base são as mesmas.

Sendo assim, a comparação das emissões ambientais deve considerar os valores absolutos de cada cenário devido à variação da vida útil. As análises podem ser feitas com a divisão do indicador pela vida útil. Essa razão pode ser interpretada como a quantidade de emissão a cada solicitação do eixo-padrão.

As análises foram separadas em dois momentos: antes e depois da etapa de manutenção. Dessa forma é possível detalhar os efeitos provocados pela necessidade de manutenção do pavimento.

7.1 Fase de construção

A Tabela 24 apresenta os resultados separados por cada cenário das fases de extração e produção de materiais e construção. As duas últimas colunas apresentam a relação entre os indicadores ambientais e a vida útil (VU). O cenário CBUQ_60golpes_90º foi retirado da análise por ser um *outlier*.

Tabela 24: Emissões por cenário - construção

Cenário	Vida útil (N)	$CO_{2\ eq}$ (t)	Energia (MJ)	$CO_{2\ eq}$/VU	Energia/VU
CBUQ_30golpes_90ºC	4,56E+06	185,48	1031,42	4,07E-05	2,26E-04
CBUQ_30golpes_140ºC	5,53E+06	187,88	1041,96	3,40E-05	1,88E-04
CBUQ_30golpes_160ºC	4,94E+06	188,25	1043,58	3,81E-05	2,11E-04
CBUQ_60golpes_140ºC	5,15E+06	189,73	1050,07	3,68E-05	2,04E-04
CBUQ_60golpes_160ºC	5,27E+06	190,16	1051,96	3,61E-05	2,00E-04
CBUQ_90golpes_90ºC	4,99E+06	187,51	1040,34	3,76E-05	2,08E-04
CBUQ_90golpes_140ºC	5,41E+06	205,36	1140,09	3,80E-05	2,11E-04
CBUQ_90golpes_160ºC	4,91E+06	205,90	1142,54	4,19E-05	2,33E-04

Fonte: Elaboração própria

O cenário CBUQ_30golpes_140ºC apresenta a menor relação $CO_{2\ eq}$/VU, o que significa que há menor emissão de gases de efeito estufa ao longo de sua vida útil em relação aos outros cenários. Esse cenário produz 7,78% a menos $CO_{2\ eq}$/VU, que a mistura padrão, apesar de ser compactada com energia fora da especificação. A redução das emissões está relacionada com a redução da densidade e aumento do volume de vazios, apresentados na Tabela 10, necessitando de menos material para a construção da mesma espessura da camada. Apesar da redução dos valores de módulo de resiliência e resistência à tração da mistura, mostrados na Tabela 11, há atendimento do critério de durabilidade, de acordo com a simulação feita no software MeDiNa.

O cenário CBUQ_90golpes_160ºC apresentou a pior relação $CO_{2\ eq}$/VU entre os cenários analisados, com acréscimo de 13,83% em relação à mistura padrão. A compactação com energia e temperatura acima do recomendado resultou em uma mistura com densidade superior à da mistura padrão, ocasionando inclusive em perda da vida útil.

As afirmações feitas em relação $CO_{2\ eq}$/VU também podem ser feitas sobre a relação Energia/VU. O cenário CBUQ_30golpes_140ºC possui a menor relação Energia/VU, com redução de 7,59%; enquanto o cenário CBUQ_90golpes_160ºC possui a maior relação entre os indicadores, com aumento de 14,12% em relação à mistura padrão.

A Tabela 25 apresenta a comparação entre os cenários do estudo de caso e a mistura padrão.

Tabela 25: Relação entre indicadores em relação à mistura padrão - construção

Cenário	% $CO_{2\ eq}$/VU	% Energia/VU
CBUQ_30golpes_90ºC	10,4%	10,9%
CBUQ_30golpes_140ºC	-7,8%	-7,6%
CBUQ_30golpes_160ºC	3,4%	3,6%
CBUQ_60golpes_140ºC	0,0%	0,0%
CBUQ_60golpes_160ºC	-2,1%	-2,1%
CBUQ_90golpes_90ºC	2,0%	2,6%
CBUQ_90golpes_140ºC	3,0%	3,4%
CBUQ_90golpes_160ºC	13,8%	14,1%

Fonte: Elaboração própria

A Figura 8 apresenta o gráfico que evidencia a relação entre a emissão de $CO_{2\ eq}$ e a vida útil de cada cenário. O gráfico foi dividido em quatro áreas, que permite dividir os cenários em grupos.

A primeira divisão foi feita pela linha vertical que indica o limite do parâmetro de durabilidade. Os cenários à esquerda da linha feita em $N = 5{,}0 \times 10^6$ necessitam de manutenção.

A segunda divisão feita foi a reta que liga a origem do gráfico até o ponto da mistura padrão no gráfico. Essa linha representa o desempenho ambiental, em termos de emissão de $CO_{2\ eq}$ da mistura padrão, portanto as misturas que se encontram acima da reta produzem mais danos ambientais do que o cenário considerado ideal.

Até a fase de construção, nenhuma mistura com temperatura de compactação de 90ºC tem desempenho ambiental melhor que a mistura padrão. Além disso, todas produziram cenários com vida útil menor que o mínimo. Esses fatores combinados indicam que a compactação em temperaturas mais baixas pode provocar prejuízos ambientais e redução da durabilidade.

O atendimento ao critério de durabilidade também foi verificado em todas as misturas com temperatura de compactação igual a 140ºC, como especificado em projeto. Esse resultado reforça a importância do controle de temperatura de compactação durante a construção do revestimento.

Todos os cenários que utilizaram a energia de compactação de projeto, 60 golpes por face, produziram cenários com durabilidade superior ao mínimo esperado. Os cenários produzidos também possuem razão $CO_{2\ eq}$/VU menores ou equivalentes à mistura padrão.

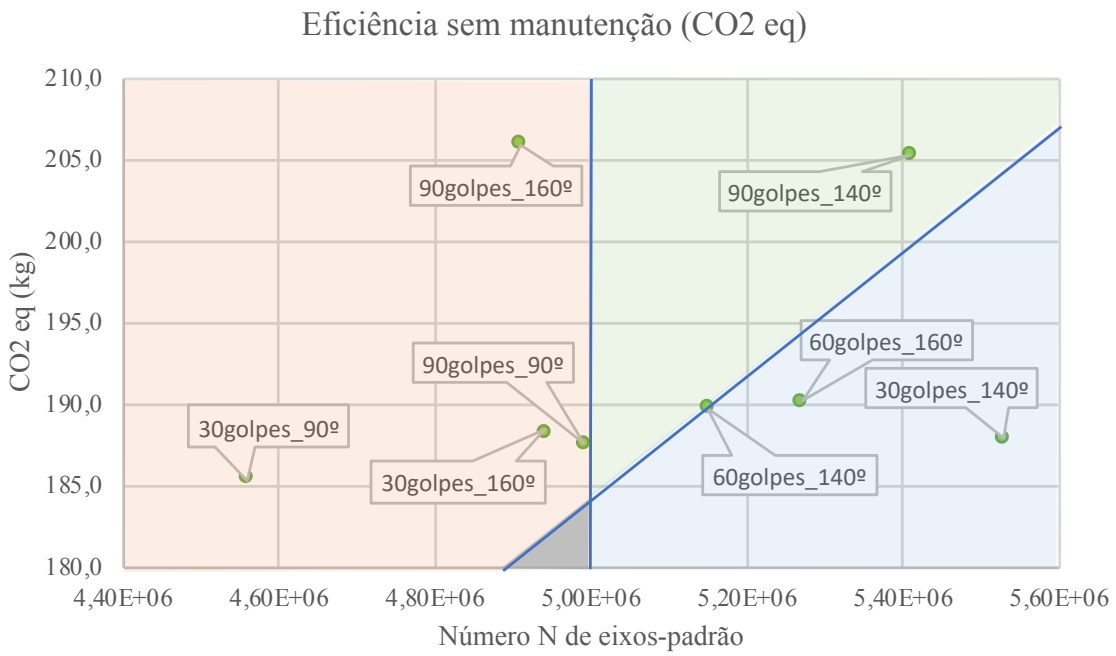


Figura 8: Eficiência dos cenários do estudo de caso ($CO_{2\ eq}$) - construção

Fonte: Elaboração própria

A Figura 9 apresenta a eficiência dos cenários de estudo considerando a energia requerida para a extração e produção dos materiais e construção do pavimento. O processo de análise do gráfico através da divisão em setores realizado na Figura 8 foi repetido na Figura 9. O panorama dos cenários encontrado em termos de CO2 eq/VU pode ser estendido para o gráfico que relaciona a energia requerida com a vida útil do estudo de caso.

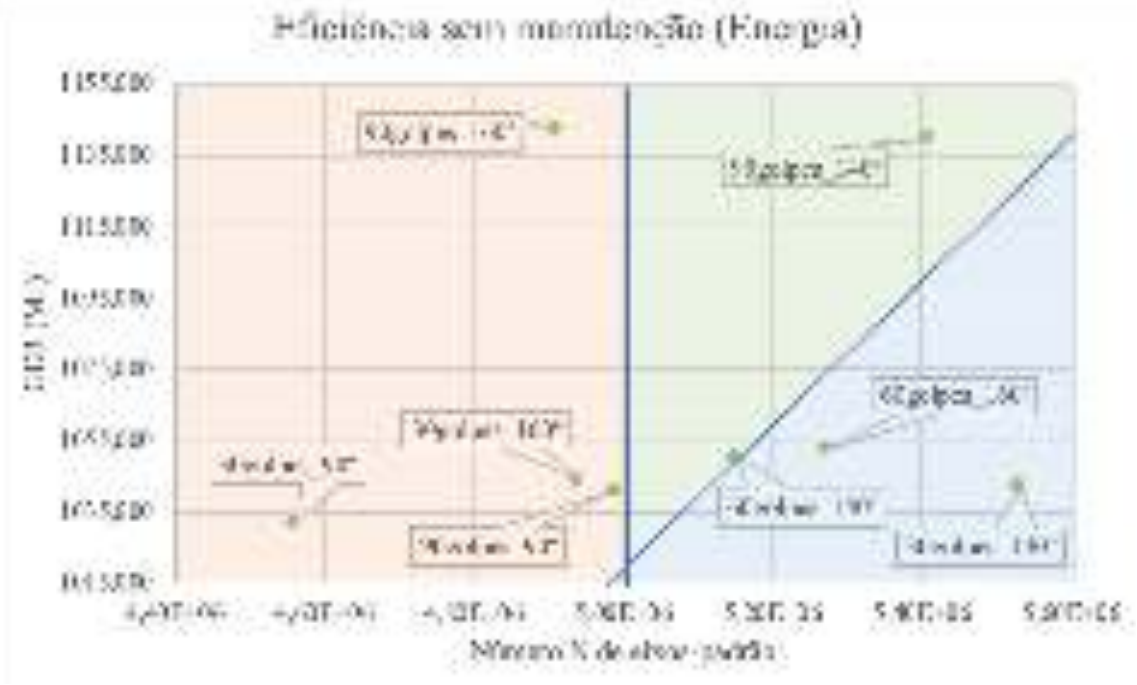


Figura 9: Eficiência dos cenários do estudo de caso (Energia) - construção

Fonte: Elaboração própria

7.2 Fase de manutenção

A Tabela 26 apresenta os indicadores ambientais calculados para cada cenário. Os resultados abordam as fases de extração e produção de materiais, construção do pavimento e manutenção, nos casos necessários. Similar à Tabela 24, as duas últimas colunas apresentam a relação entre os indicadores ambientais e a vida útil (VU). O cenário CBUQ_60golpes_90ºC foi retirado da análise por ser um *outlier*.

Tabela 26: Emissões por cenário - construção e manutenção

Cenário	Vida útil (N)	$CO_{2\ eq}$ (t)	Energia (MJ)	$CO_{2\ eq}$/VU	Energia/VU
CBUQ_30golpes_90ºC	5,08E+06	334,18	1774,73	6,58E-05	3,49E-04
CBUQ_30golpes_140ºC	5,53E+06	187,88	1041,96	3,40E-05	1,88E-04
CBUQ_30golpes_160ºC	5,11E+06	336,89	1786,89	6,59E-05	3,50E-04
CBUQ_60golpes_140ºC	5,15E+06	189,73	1050,07	3,68E-05	2,04E-04
CBUQ_60golpes_160ºC	5,27E+06	190,16	1051,96	3,61E-05	2,00E-04
CBUQ_90golpes_90ºC	5,10E+06	336,16	1783,65	6,59E-05	3,50E-04
CBUQ_90golpes_140ºC	5,41E+06	205,36	1140,09	3,80E-05	2,11E-04
CBUQ_90golpes_160ºC	5,12E+06	354,55	1885,84	6,92E-05	3,68E-04

Fonte: Elaboração própria

Após a etapa de manutenção, todos os cenários cumprem o critério da durabilidade mínima, definida como $N = 5{,}0 \times 10^6$. Como a mesma intervenção foi repetida para todos os cenários necessários, houve acréscimo de vida útil além do mínimo.

O cenário CBUQ_30golpes_140ºC continua tendo as menores relações $CO_{2\ eq}$/VU e Energia/VU. Os valores permanecem os mesmos pois não há necessidade de intervenção, considerando as análises feitas pelo *software* MeDiNa para o período de projeto.

O CBUQ_90golpes_160ºC também apresenta a maior relação de $CO_{2\ eq}$/VU e Energia/VU após a fase de manutenção. A manutenção simulada provocou aumento das emissões e impactos ambientais para que houvesse ganho de durabilidade, fazendo com que o desempenho do cenário, em termos ambientais, piorasse. A piora do desempenho passou de 13,83% e 14,12%, comparando as razões $CO_{2\ eq}$/VU e Energia/VU com a mistura padrão, para 87,97% e 80,64%, respectivamente.

A Tabela 27 apresenta a comparação entre os cenários do estudo de caso e a mistura padrão.

Tabela 27: Relação entre indicadores em relação à mistura padrão - manutenção

Cenário	Vida útil (N)	CO_2 eq/VU (%)	Energia/VU (%)
CBUQ_30golpes_90ºC	5,08E+06	78,5%	71,3%
CBUQ_30golpes_140ºC	5,53E+06	-7,8%	-7,6%
CBUQ_30golpes_160ºC	5,11E+06	79,0%	71,5%
CBUQ_60golpes_140ºC	5,15E+06	0,0%	0,0%
CBUQ_60golpes_160ºC	5,27E+06	-2,1%	-2,1%
CBUQ_90golpes_90ºC	5,10E+06	78,9%	71,5%
CBUQ_90golpes_140ºC	5,41E+06	3,0%	3,4%
CBUQ_90golpes_160ºC	5,12E+06	88,0%	80,6%

Fonte: Elaboração própria

A Figura 10 apresenta o gráfico com a relação entre $CO_{2\ eq}$ emitido em cada cenário e a sua respectiva vida útil, em termos de número N, ao longo do ciclo de vida. O gráfico apresenta apenas a divisão em duas áreas considerando a mistura padrão como referência para o desempenho ambiental.

A modelagem da etapa de manutenção provocou aumento considerável nos cenários que não atendiam o critério mínimo de durabilidade da estrutura. Dessa forma, é possível notar que, após a manutenção exigida, há aumento expressivo das razões $CO_{2\ eq}$/VU e Energia/VU em relação à mistura padrão.

Os cenários com temperatura de compactação diferente de 140ºC apresentam, em sua maioria, piora na relação $CO_{2\ eq}$/VU e Energia/VU, ou seja, emitem mais $CO_{2\ eq}$ e necessitam de mais energia por repetição do eixo-padrão. A perda de eficiência não foi verificada apenas para o cenário com energia de compactação igual à mistura padrão. Essa situação se dá pela influência de temperatura na viscosidade do ligante asfáltico durante compactação de misturas asfálticas.

Foi encontrada pouca variação entre os cenários com temperatura de compactação igual a 140ºC, com valores inferiores a 10% em relação a mistura padrão.

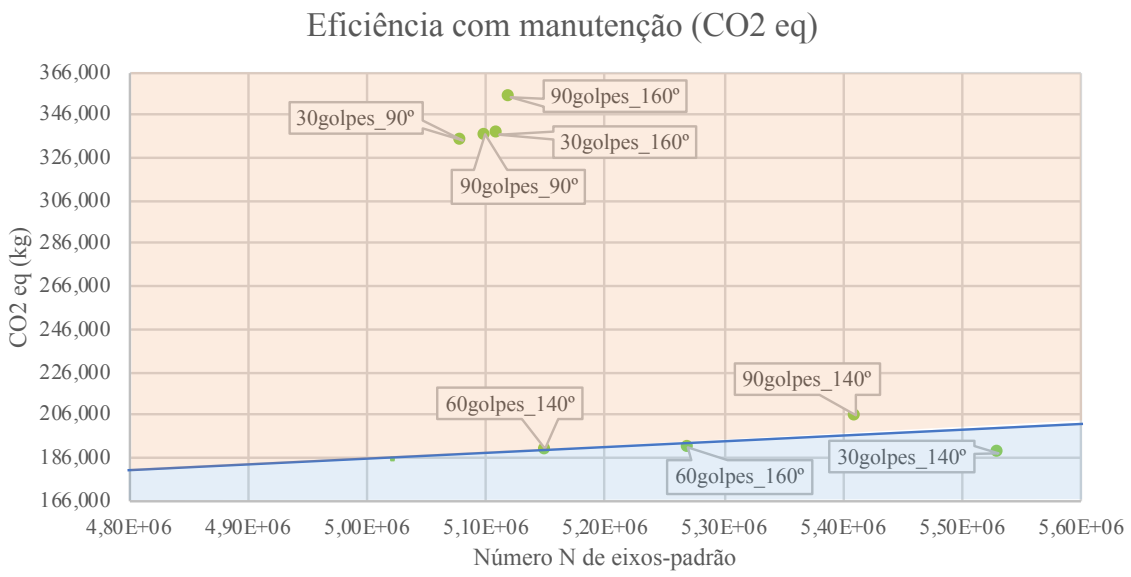


Figura 10: Eficiência dos cenários do estudo de caso (CO2 eq) – manutenção

Fonte: Elaboração própria

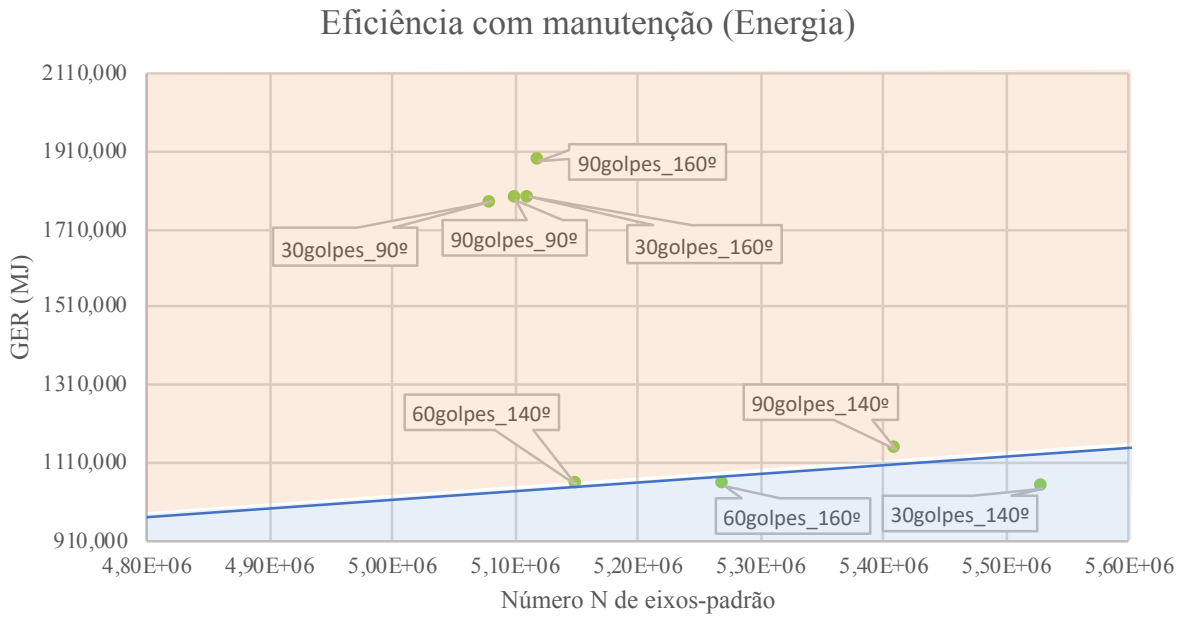


Figura 11 apresenta a eficiência dos cenários de estudo considerando a energia requerida considerando todas as etapas do ciclo de vida estudadas. A linha traçada no gráfico representa, assim como na Figura 10, a referência do desempenho ambiental, representada pelo cenário da mistura padrão.

Assim como na Figura 10, os cenários com temperatura de compactação diferentes de 140ºC, em sua maioria, produziram os piores resultados. Não houve muita variação entre

os cenários com temperatura de compactação igual a 140ºC, variando menos de 10% em relação a mistura padrão.

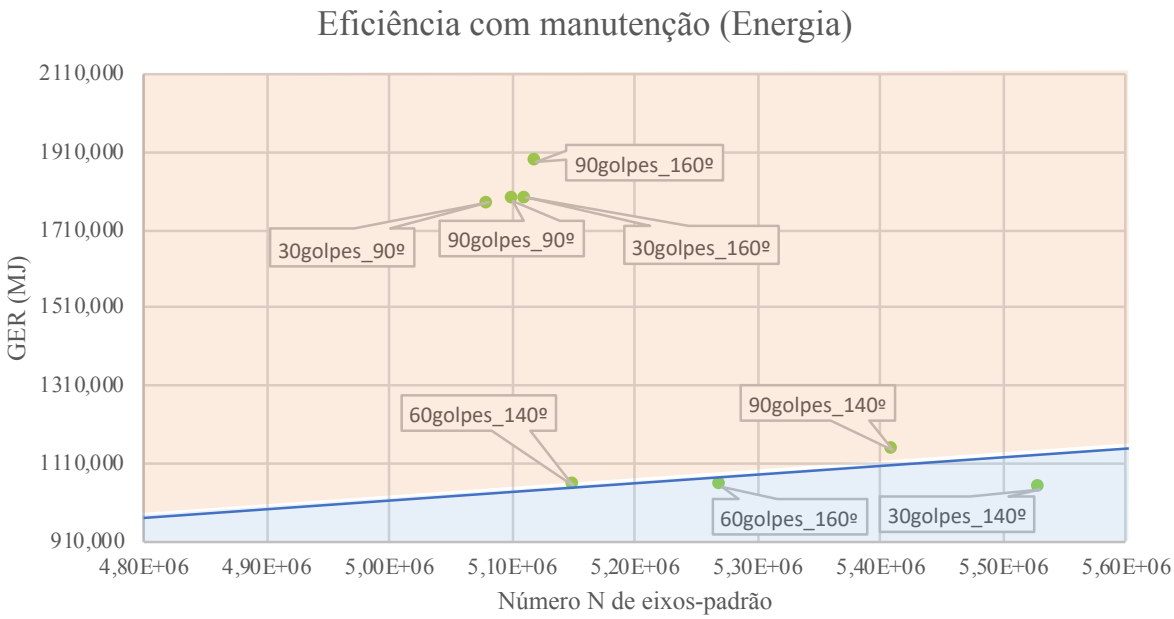


Figura 11: Eficiência dos cenários do estudo de caso (Energia) – manutenção

Fonte: Elaboração própria

A análise das relações CO2 eq/VU e Energia/VU mostrou que houve significativa aumento nos indicadores após a etapa de manutenção, chegando a 75,40% e 67,75%, respectivamente. A Tabela 28 apresenta a variação dos indicadores após a etapa de manutenção.

Tabela 28: Comparação de cenários após a manutenção

Cenário	CO_2 eq/VU (%)	Energia/VU (%)
CBUQ_30golpes_90ºC	61,7%	54,5%
CBUQ_30golpes_160ºC	73,0%	65,5%
CBUQ_90golpes_90ºC	75,4%	67,8%
CBUQ_90golpes_160ºC	65,1%	58,3%

Fonte: Elaboração própria

8 Conclusão

A ACV é uma ferramenta que pode fornecer uma visão mais holística dos impactos ambientais provocados pela construção de infraestruturas rodoviárias. Entretanto os resultados dependem muito do nível de detalhamento do estudo. A seleção de fases de análise ou indicadores ambientais podem impactar nos resultados finais, que devem ser analisados por tomadores de decisões.

A inclusão da manutenção provocou mudanças significativas nos cenários de estudo. Houve um aumento expressivo nas relações de $CO_{2\ eq}$/VU e Energia/VU dos cenários, chegando a 75,40% e 67,75%, respectivamente. Esse resultado reforça a importância da simulação dos cenários, considerando as intervenções necessárias para cada situação.

O presente estudo abordou a união de dois parâmetros, a estimativa de vida útil com indicadores ambientais, resultando em uma nova métrica para análise dos cenários, estabelecendo a razão entre a emissão ambiental e o desempenho mecânico. A medida foi proposta diante da diferença de durabilidade entre os cenários. Esse novo indicador propõe aliar a teoria das análises ambientais com os conceitos de engenharia aplicados no projeto de rodovias.

Após a inserção do novo indicador, foi verificado que os cenários com temperatura de compactação diferente da especificada produzem, na maioria das vezes, mais impactos ao longo do ciclo de vida. Esse resultado confirma as principais recomendações encontradas na literatura que apontam a falta de controle de temperatura como um dos principais problemas na execução do revestimento asfáltico, considerando as características termoplásticas do material.

Os resultados das análises propostas apontam que a temperatura de compactação é um fator crítico para a execução, de acordo com os indicadores ambientais propostos. O controle desse parâmetro resultou em pavimentos com resultados similares, isto é, com pouca variação entre si, apesar da energia de compactação diferente. A Tabela 27 aponta que os três cenários com temperatura de compactação de 140ºC ficaram entre as 4 melhores relações $CO_{2\ eq}$/VU e Energia/VU.

A análise dos impactos produzidos por diferentes tipos de manutenção é recomendada como estudos futuros dessa pesquisa, assim como o refinamento da modelagem de forma

que inclua serviços complementares, como pintura de ligação, imprimação, utilização de materiais reciclados, etc. Além disso, a metodologia proposta pode ser aplicada considerando as seguintes variações de cenários

- Aplicação do número de golpes recomendados pelo método Marshall: 50 ou 75;
- Diferentes temperaturas de compactação;
- Mudança de materiais como asfaltos modificados e rejeitos etc.;
- Outros tipos de misturas: misturas descontínuas (SMA) e abertas (CPA);

Referências

Albuquerque, A. P. F. de. (2005) *Influência da energia e da temperatura de compactação nos parâmetros volumétricos e nas propriedades mecânicas dos concretos asfálticos*. Instituto Militar de Engenharia.

Araújo, J. P. C., Oliveira, J. R. M., e Silva, H. M. R. D. (2014) The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *32*, 97–110. doi:10.1016/j.trd.2014.07.006

Aurangzeb, Q., Al-qadi, I. L., Ozer, H., e Yang, R. (2014) Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources, Conservation & Recycling*, *83*, 77–86. doi:10.1016/j.resconrec.2013.12.004

AzariJafari, H., Yahia, A., e Ben Amor, M. (2016) Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 2187–2197. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.080

Balbo, J. T. (2007) *Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração*. Oficina de Textos, São Paulo.

Batouli, M., Bienvenu, M., e Mostafavi, A. (2017) Putting sustainability theory into roadway design practice: Implementation of LCA and LCCA analysis for pavement type selection in real world decision making. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *52*, 289–302. doi:10.1016/j.trd.2017.02.018

Bernucci, L. B., Motta, L. M. G. da, Ceratti, J. A. P., e Soares, J. B. (2006) *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*. PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro.

Bi, Y., Huang, J., Pei, J., Zhang, J., Guo, F., e Li, R. (2021) Compaction characteristics assessment of Hot-Mix asphalt mixture using Superpave gyratory compaction and Stribeck curve method. *Construction and Building Materials*, *285*, 122874. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122874

Bressi, S., Santos, J., Oreskovic, M., e Losa, M. (2019) A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt

pavement using life cycle assessment. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PAVEMENT ENGINEERING*. doi:10.1080/10298436.2019.1623404

Butt, A. A., Birgisson, B., e Kringos, N. (2015) Considering the benefits of asphalt modification using a new technical life cycle assessment framework a new technical Life Cycle Assessment framework., *3730*(September). doi:10.3846/13923730.2014.914084

Carvalho, M. D. de. (2018) Competitividade e Sustentabilidade dos Pavimentos de Concreto. O Pavimento de Concreto No Brasil - As Vias do Futuro. *ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland*. Obtido 19 de março de 2022, de https://sitefiespstorage.blob.core.windows.net/observatoriodaconstrucao/2017/12/Marcos-Dutra.pdf

Celauro, C., Corriere, F., Guerrieri, M., Lo, B., e Rizzo, A. (2016) Environmental analysis of different construction techniques and maintenance activities for a typical local road. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2016.10.119

Chen, F., Zhu, H., Yu, B., e Wang, H. (2016) Environmental burdens of regular and long-term pavement designs: a life cycle view. *International Journal of Pavement Engineering*, *17*(4), 300–313. doi:10.1080/10298436.2014.993189

Cheng, Z., Jia, X., Jiang, H., Hu, W., e Huang, B. (2021) Quantification of impact compaction locking point for asphalt mixture., (December 2020).

Chiu, C.-T., Hsu, T.-H., e Yang, W.-F. (2008) Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, *52*(3), 545–556. doi:10.1016/j.resconrec.2007.07.001

DNIT. Manual de pavimentação. , Pub. L. No. IPR 719 (2006). Rio de Janeiro, Brasil.

DNIT. (2017) *Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes: Volume 03*.

DNIT. (2021) *Sistema de Custos Gerenciais de Obra (SICRO)*.

Facanha, C., e Horvath, A. (2007) Evaluation of Life-Cycle Air Emission Factors of Freight Transportation. *Environmental Science & Technology*, *41*(20), 7138–7144.

Farina, A., Zanetti, M. C., Santagata, E., e Blengini, G. A. (2017) Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, *117*, 204–212. doi:10.1016/j.resconrec.2016.10.015

Franco, F. A. C. de P., e Motta, L. M. G. da. (2020) *Manual de Utilização do programa MeDiNa*. Obtido de https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf

Giani, M. I., Dotelli, G., Brandini, N., e Zampori, L. (2015) Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, *104*, 224–238. doi:10.1016/j.resconrec.2015.08.006

Gulotta, T. M., Mistretta, M., e Praticò, F. G. (2019) A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads. *Science of the Total Environment*, *673*, 585–593. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.04.046

Häkkinen, T., e Mäkelä, K. (1996) *Environmental adaption of concrete: Environmental impaction of concrete and asphalt pavement*. VTT TIEDOTTEITA, Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland.

Hasan, U., Whyte, A., e Al, H. (2020) Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates : Recycled construction waste , reclaimed asphalt pavement , warm-mix asphalt and blast furnace slag use against traditional approach. *Journal of Cleaner Production*, *257*, 120531. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120531

Horvath, A., e Hendrickson, C. (1998) Comparison of Environmental Implications of Asphalt and Steel-Reinforced. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (98), 105–113.

Huang, Y., Bird, R., e Heidrich, O. (2009) Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, *17*(2), 283–296. doi:10.1016/j.jclepro.2008.06.005

Inti, S., Sharma, M., e Tandon, V. (2016) An Approach for Performing Life Cycle Impact Assessment of Pavements for Evaluating Alternative Pavement Designs. *Procedia Engineering*, *145*, 964–971. doi:10.1016/j.proeng.2016.04.125

Inyim, P., Pereyra, J., Bienvenu, M., e Mostafavi, A. (2016) Environmental assessment of pavement infrastructure: A systematic review. *Journal of Environmental Management*, *176*, 128–138. doi:10.1016/j.jenvman.2016.03.042

IPCC, W. G. I. (2014) *AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*.

Liu, X., Cui, Q., e Schwartz, C. (2014) Greenhouse gas emissions of alternative pavement designs: Framework development and illustrative application. *Journal of Environmental Management*, *132*, 313–322. doi:10.1016/j.jenvman.2013.11.016

Loijos, A. (2005) *Life Cycle Assessment of Concrete Pavements : Impacts and Opportunities*. Massachusetts Institute of Technology.

Motamedi, H., Fazaeli, H., Aliha, M. R. M., e Reza, H. (2020) Evaluation of temperature and loading rate effect on fracture toughness of fiber reinforced asphalt mixture using edge notched disc bend (ENDB) specimen. *Construction and Building Materials*, *234*, 117365. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117365

Mroueh, U., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Wellman, K., Juvankoski, E. M. M., e Ruotoistenmäki, A. (2000) *Life Cycle Assessment of Road Construction.* Helsinki, Finland.

Nascimento, F., Gouveia, B., Dias, F., Ribeiro, F., e Silva, M. A. (2020) A method to select a road pavement structure with life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 122210. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122210

NCHRP, N. C. H. R. P. (2011) *A Manual for Design of Hot-Mix Asphalt with Commentary*. The National Academies Press, Washington, DC. doi:10.17226/14524

Nisbet, M. A., Marceau, M. L., e VanGeem, M. G. (2007) *Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete*. Skokie, Illinois.

Park, K., Hwang, Y., Seo, S., Asce, M., e Seo, H. (2003) Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Highways., (February), 25–31.

Santero, N. J., Masanet, E., e Horvath, A. (2011) Life-cycle assessment of pavements . Part I : Critical review. *"Resources, Conservation & Recycling"*, *55*(9–10), 801–809. doi:10.1016/j.resconrec.2011.03.010

Santos, J., Ferreira, A., e Flintsch, G. (2015) A life cycle assessment model for pavement management: Road pavement construction and management in Portugal. *International Journal of Pavement Engineering*, *16*(4), 315–336. doi:10.1080/10298436.2014.942862

Santos, J., Pham, A., Stasinopoulos, P., e Giustozzi, F. (2021) Recycling waste plastics in roads : A life-cycle assessment study using primary data. *Science of the Total Environment*, *751*, 141842. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141842

Santos, João, Ferreira, A., e Flintsch, G. (2017) A multi-objective optimization-based pavement management decision-support system for enhancing pavement sustainability. *Journal of Cleaner Production*, *164*, 1380–1393. doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.027

Spielmann, M., e Scholz, R. W. (2005) The ecoinvent Database: Life Cycle Inventories of Transport Services Background Data for Freight Transport. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, (February 2019). doi:10.1065/lca.10.181.10

Stripple, H. (2001a) *Life Cycle Assessment of Road: A Pilot Study for Inventory Analysis*. *Second Revised Edition*. Gothenburg, Sweden.

Stripple, H. (2001b) *Life Cycle Assessment of Roads: A Pilot Study for Inventory Analysis*.

Thenoux, G., e Dowling, R. (2007) Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile. *Resources, Conservation and Recycling*, *49*, 325–339. doi:10.1016/j.resconrec.2006.02.005

Treloar, G. J., Love, P. E. D., e Crawford, R. H. (2004) Hybrid Life-Cycle Inventory for Road Construction and Use., (February), 43–49.

United States Environmental Protection Agency. (2021) Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks. Obtido de https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks

Wang, H., Al-Saadi, I., Lu, P., e Jasim, A. (2019) Quantifying greenhouse gas emission of asphalt pavement preservation at construction and use stages using life-cycle assessment. *International Journal of Sustainable Transportation*. Department of

Civil and Environmental Engineering, Rutgers University, Piscataway, NJ, United States. doi:10.1080/15568318.2018.1519086

Wang, T., Lee, I.-S., Kendall, A., Harvey, J., Lee, E.-B., e Kim, C. (2012) Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance. *Journal of Cleaner Production*, *33*, 86–96. doi:10.1016/j.jclepro.2012.05.001

Yoder, E. J., e Witczak, M. W. (1975) *Principles of Pavement Design*. (2nd editio.). Ed. John Wiley & Sons Inc., New York, USA.

Yu, B., e Lu, Q. (2012) Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *17*(5), 380–388. doi:10.1016/j.trd.2012.03.004

Zapata, P., Gambatese, J. A., e Asce, M. (2005) Energy Consumption of Asphalt and Reinforced Concrete Pavement Materials and Construction. *Journal of Infrastructure Systems*, (March), 9–20.

Zhang, H., Ph, D., Keoleian, G. A., Lepech, M. D., e Kendall, A. (2010) Life-Cycle Optimization of Pavement Overlay Systems. *Journal of Infrastructure Systems*, (December), 310–322.

Zhang, H., Ph, D., Lepech, M. D., Keoleian, G. A., Qian, S., e Li, V. C. (2010) Dynamic Life-Cycle Modeling of Pavement Overlay Systems : Capturing the Impacts of Users , Construction , and Roadway Deterioration. *Journal of Infrastructure Systems*, (December), 299–309.

Zhao, Y., Xie, S., Gao, Y., Zhang, Y., e Zhang, K. (2021) Prediction of the number of roller passes and degree of compaction of asphalt layer based on compaction energy. *Construction and Building Materials*, *277*, 122274. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122274

Anexos

Anexo – Relatórios de Análise dos Pavimentos

30 GOLPES- 90 GRAUS

Programa MeDiNa

Análise do pavimento

ALERTAS

Estrutura do pavimento

Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resilência	Coeficiente Poisson
1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Materiais

1 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

2 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

3 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

4 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

Definição do tráfego

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Evolução dos danos no pavimento

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

[illegible]	[illegible]	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	[illegible]	[illegible]
2	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

Deflexiones

[illegible]

[illegible]

Equipamiento	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

Equipamiento	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

Equipamiento	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

Equipamiento	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Programa McDiNa

Análise do pavimento

ALERTAS

Estrutura do pavimento

Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resilência	Coef. de Poisson
1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Materiais

1 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

2 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

3 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

4 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

Definição do tráfego

[illegible]

[illegible]	Tipo	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Evolução dos danos no pavimento

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]

Deflexões

[illegible]

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Programa MeDiNa

Análise do pavimento

ALERTAS

Estrutura do pavimento

Materiais

[illegible]

Propriedades	Valores
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Valores
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Valores
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Valores
[illegible]	[illegible]

Definição do tridrego

Rev.	Tipo	FP	Comprimento	IC	IRI
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Evolução dos danos no pavimento

Mês	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Seção	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

60 GOLPES- 90 GRAUS

Programa MeDiNa

Análise do pavimento

ALERTAS

Estrutura do pavimento

Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resilência	Coef. de Poisson
1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Materiais

1 - CONCRETO ARMADO [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

2 - MATERIAL CONSTRUÍDO [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

3 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

4 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

Definição do tráfego

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Evolução dos danos no pavimento

Mês	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible] Trilha de Roda (mm)
[illegible]	[illegible]

Deflexões

[illegible]

[illegible]

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
FWD [illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
FWD [illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
FWD [illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
FWD [illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Programa McDiNa

Análise do pavimento

ALERTAS

Estrutura do pavimento

Cam.	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef. de Poisson
1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Materiais

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

Definição do tráfego

[illegible]

[illegible]	Tipo	N	Carga (ton)	Pc	Pci
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR Trinc
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento na Trilha de Roda (mm)
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]

Deflexões

[illegible]

[illegible]

[illegible]	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Programa MeDiNa

Análise do pavimento

ALERTAS

Estrutura do pavimento

Cam.	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resilência	Coef. de Poisson
1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Materiais

[illegible]

Propriedades	Modelo
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Modelo
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Modelo
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Modelo
[illegible]	[illegible]

Definição do tráfego

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Evolução das danos no pavimento

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]

Deflexiones

[illegible]

[illegible]

Equipamiento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

Equipamiento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

Equipamiento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

Equipamiento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Programa MeDINa

Análise do pavimento

ALERTAS

Estrutura do pavimento

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Resilência	Coef. de Poisson
1			
2			
3			
4			

Materiais

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

Definição do tráfego

[illegible]

[illegible]	Tipo	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Evolução dos danos no pavimento

Mês	[illegible]	Área Trincada	[illegible]
1	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

[illegible]	[illegible]	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	[illegible]	[illegible]
2	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible]	Abundancia de Trilha de Roda (mm)
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
	Abundancia de Trilha de Roda (mm)	[illegible]

Deflexões

[illegible]

[illegible]

Equipamento	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

Equipamento	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

Equipamento	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

Equipamento	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Qualitativo	Sensor 1 (cm)	Sensor 2 (cm)	Sensor 3 (cm)	Sensor 4 (cm)	Sensor 5 (cm)	Sensor 6 (cm)	Sensor 7 (cm)	Sensor 8 (cm)	Sensor 9 (cm)
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Programa MeDiNa

Análise do pavimento

ALERTAS

Estrutura do pavimento

Nº	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resilência	Coef. de Poisson
1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Materiais

1 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

2 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

3 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

4 - [illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

Definição do tratego

[illegible]

[illegible]	Tipo	[illegible]	Largura (m)	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Evolução dos danos no pavimento

Via	[illegible]	Área trincada	[illegible] (m²)
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

[illegible]	[illegible]	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

Cor: Vermelho	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
Afundamento de Trilha de Roda (mm)	[illegible]

Defletores

[illegible]

Defletómetro utilizado: [illegible] Viga: [illegible] graus C [illegible]

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 30 cm	Sensor 3 60 cm	Sensor 4 90 cm	Sensor 5 120 cm	Sensor 6 150 cm	Sensor 7 180 cm	Sensor 8 210 cm	Sensor 9 240 cm
Viga Benkelman Carga: [illegible] kN	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
FWD Carga: [illegible] kN	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Defletómetro utilizado: [illegible] Viga: [illegible] graus C [illegible]

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 30 cm	Sensor 3 60 cm	Sensor 4 90 cm	Sensor 5 120 cm	Sensor 6 150 cm	Sensor 7 180 cm	Sensor 8 210 cm	Sensor 9 240 cm
Viga Benkelman Carga: [illegible] kN	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
FWD Carga: [illegible] kN	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Defletómetro utilizado: [illegible] Viga: [illegible] graus C [illegible]

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 30 cm	Sensor 3 60 cm	Sensor 4 90 cm	Sensor 5 120 cm	Sensor 6 150 cm	Sensor 7 180 cm	Sensor 8 210 cm	Sensor 9 240 cm
Viga Benkelman Carga: [illegible] kN	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
FWD Carga: [illegible] kN	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Defletómetro utilizado: [illegible] Viga: [illegible] graus C [illegible]

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 30 cm	Sensor 3 60 cm	Sensor 4 90 cm	Sensor 5 120 cm	Sensor 6 150 cm	Sensor 7 180 cm	Sensor 8 210 cm	Sensor 9 240 cm
Viga Benkelman Carga: [illegible] kN	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
FWD Carga: [illegible] kN	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Programa MeDINa [illegible]

[illegible]

Análise do pavimento

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

ALERTAS

[illegible]

[illegible]

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Dist Básico	Coef de Poisson
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Materiais

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

Definição do tráfego

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Evolução dos danos no pavimento

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]

Deflexões

[illegible]

[illegible]

[illegible]	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]

[illegible]	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

REFORÇO - 30 GOLPES- 90 GRAUS

Programa MeDINa

Análise do reforço do pavimento

ALERTAS

Estrutura do pavimento

Nº	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resilência	Coef. de Poisson
1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Materiales

1 - [illegible]

Propiedades	Modelos
[illegible]	[illegible]

2 - [illegible]

Propiedades	Modelos
[illegible]	

3 - [illegible]

Propiedades	Modelos
[illegible]	

4 - [illegible]

Propiedades	Modelos

Propriedade	Valor
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	

[illegible]

Propriedade	Valor
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	

Definição do tráfego

[illegible]

[illegible]	Tipo	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Evolução dos danos no pavimento

Mês	Ninquer	Área trincada
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

Definições

[illegible]

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

REFORÇO - 30 GOLPES- 160 GRAUS

Programa MeDiNa

Análise do reforço do pavimento

ALERTAS

Estrutura do pavimento

Nome	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resilência	Coef. de Poisson
1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Curv. Mandrel	Deformação Sup.	Módulo de Ruptura	Coef. de Poisson
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Materiais

1. [illegible]

Propriedades	Valores
Tipo de [illegible]	Curva de Fadiga
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
	[illegible]
	[illegible]

2. [illegible]

Propriedades	Valores
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	

3. [illegible]

Propriedades	Valores
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	

4. [illegible]

Propriedades	Valores

Propriedades	Módulos
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	

[illegible]

Propriedades	Módulos
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	

Definição do tráfego

[illegible]

[illegible]	Tipo	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Evolução dos danos no pavimento

Mês	[illegible]	Área Trincada
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

Deflexões

[illegible]

[illegible]

[illegible]	Sensor 1 [illegible]	Sensor 2 [illegible]	Sensor 3 [illegible]	Sensor 4 [illegible]	Sensor 5 [illegible]	Sensor 6 [illegible]	Sensor 7 [illegible]	Sensor 8 [illegible]	Sensor 9 [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Programa MeDiNa

Análise do reforço do pavimento

ALERTAS

Estrutura do pavimento

	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
5	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Materiais

1 - [illegible]

Requisitos	Modelos
[illegible]	Dados de Entrada [illegible] [illegible] [illegible] [illegible] Dados de Saída [illegible] [illegible]

2 - [illegible]

Requisitos	Modelos
[illegible]	

3 - [illegible]

Requisitos	Modelos
[illegible]	

4 - [illegible]

Requisitos	Modelos
[illegible]	

Definição do tráfego

Eixo	Tipo	FP	Carga (kN)	FT	FA

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada

Deflexões

[illegible]

[illegible]

Equipamento	Deflexão 1 (0 cm)	Deflexão 2 (20 cm)	Deflexão 3 (30 cm)	Deflexão 4 (45 cm)	Deflexão 5 (60 cm)	Deflexão 6 (90 cm)	Deflexão 7 (120 cm)	Deflexão 8 (150 cm)	Deflexão 9 (180 cm)
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

REFORÇO - 90 GOLPES- 160 GRAUS

Programa MeDiNa

Análise do reforço do pavimento

ALERTAS

Estrutura do pavimento

Cam. Material	Espessura (cm)	Módulo de Det. Elástico	Coef. de Poisson
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Cód. Material	Representante	Módulo de Emissão	Custo Estimado
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Materiais

1 - [illegible]

Propriedade	Módulo
[illegible]	[illegible]

2 - [illegible]

Propriedade	Módulo
[illegible]	

3 - [illegible]

Propriedade	Módulo
[illegible]	

4 - [illegible]

Propriedade	Módulo

Propriedades	Modelos
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	

[illegible]

Propriedades	Modelos
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	
[illegible]	

Definição do tráfego

[illegible]

[illegible]	Tipo	[illegible]	Carga (ton)	[illegible]	[illegible]
1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Evolução das dunas no pavimento

Mês	[illegible]	Área [illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

Defiendes

[illegible]

[illegible]

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]