

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

Luan Somavilla da Rosa

**SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA E AMBIENTAL EM PROJETOS
RODOVIÁRIOS: A POTENCIALIDADE DA METODOLOGIA LIFE CYCLE
COSTING**

SANTA MARIA

2023

Luan Somavilla da Rosa

**SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA E AMBIENTAL EM PROJETOS
RODOVIÁRIOS: A POTENCIALIDADE DA METODOLOGIA LIFE CYCLE
COSTING.**

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

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria

2023

Luan Somavilla da Rosa

**SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA E AMBIENTAL EM PROJETOS
RODOVIÁRIOS: A POTENCIALIDADE DA METODOLOGIA LIFE CYCLE
COSTING.**

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

Aprovado em 20 de dezembro de 2023.

Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)

(Orientador)

Silvio Lisbôa Schuster, Dr. (UFSM)

(Avaliador)

Victória Nunes Ramos, Ma. (UFSM)

(Avaliador)

Santa Maria

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, meus mentores e guias espirituais, que me proporcionaram e guiaram esse longo percurso, me mantendo firme, com foco e determinação para alcançar um objetivo traçado ainda quando criança, sempre com fé, sabedoria e humildade. Sem isso, estaria à mercê de toda ansiedade, portanto, cabe a mim, agradecer por toda a proteção diária.

Agradeço imensamente a minha mãe, Andrea, mãe solteira e guerreira, que em momento algum se deu por vencida, sempre me ensinando os valores mais importantes que um ser humano deve carregar consigo. Não tenho palavras para descrever tamanha determinação durante toda a sua vida para que momentos como esse, pudessem se tornar realidade. Nunca mediu esforços para que eu e meu irmão, Kauã, pudéssemos ir atrás dos nossos sonhos, mas sempre nos lembrando de onde viemos e aonde queremos chegar. Aliás, mãe, como tu mesmo me diz: “nunca vou interferir no caminho da tua felicidade”, portanto, te digo, essa conquista é nossa, essa felicidade é nossa!

À minha namorada, Giovanna, que ao longo de sete anos, sempre esteve ao meu lado, sempre acreditando no meu potencial e me fortalecendo, não medindo esforços para me ver bem. Sonhávamos com a mesma profissão quando nos conhecemos e, hoje, quis o destino que fôssemos colegas. Que possamos dividir inúmeras conquistas!

Não posso deixar de mencionar minha vó, Romilda, uma das mulheres da minha vida. Sempre esteve junto a mim e a minha mãe, nos dando suporte onde mais precisávamos, sem hesitar. Me ensinou a gostar dos números e da matemática e, hoje, tenho o privilégio de compartilhar esse sonho com ela.

Aos meus amigos de longa data que sempre estiveram comigo, apoiando os momentos de dificuldade, nos incansáveis “não foi dessa vez” quando via os resultados de uma prova para ingressar na UFSM. Mas junto a eles, as amizades recentes, onde todos vocês tornam os meus dias mais leves, com mais cor e vida. Infelizmente, não posso citar todos aqui, mas saibam que cada um de vocês tem um lugar especial no meu coração e fazem parte dessa conquista.

Ao meu orientador, Luciano, agradeço o empenho durante o desenvolvimento desse trabalho, me encorajando a escrever sobre um tema ainda pouco explorado. Meu muito obrigado ter aceito esse desafio!

Por último, a Universidade Federal de Santa Maria, por ser a minha segunda casa durante os últimos cinco anos, proporcionando um ensino de qualidade, gratuito e que luta por um legado de grande renome. Muito obrigado!

RESUMO

SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA E AMBIENTAL EM PROJETOS RODOVIÁRIOS: A POTENCIALIDADE DA METODOLOGIA LIFE CYCLE COSTING.

AUTOR: Luan Somavilla da Rosa

ORIENTADOR: Luciano Pivoto Specht

A aplicação da metodologia *Life Cycle Costing (LCC)*, aplicada às rodovias, representa um avanço substancial na gestão estratégica no setor de infraestrutura de transporte. Este estudo aborda por meio de uma revisão da literatura, os motivos que justificam a aplicação, destacando a sua relevância econômica e sustentável. No âmbito rodoviário, a consideração convencional dos custos está praticamente restrita à fase inicial de construção. No entanto, a análise do ciclo de vida revela uma perspectiva mais abrangente, por meio da análise econômica, demonstra-se que o LCC oferece uma compreensão detalhada dos custos envolvidos em cada estágio das rodovias, permitindo uma alocação eficiente de recursos e a identificação de estratégias que minimizem os custos ao longo do tempo. Além disso, a abordagem sustentável do LCC considera não apenas os custos financeiros, mas também os impactos ambientais, sociais e econômicos, proporcionando uma gestão mais responsável e equilibrada das rodovias. Ao fundamentar decisões baseadas em uma análise ampla dos custos ao longo do ciclo de vida das rodovias, o LCC destaca-se como uma ferramenta relevante para a tomada de decisões estratégicas. Essa metodologia não apenas fortalece a gestão financeira das rodovias, mas também promove uma visão mais consciente e sustentável da implantação, manutenção ou reabilitação das vias. Dessa forma, a realização de um estudo focado na metodologia *Life Cycle Costing* aplicada às rodovias é justificada pela sua capacidade de otimizar os recursos, minimizar os custos e maximizar os benefícios econômicos e ambientais ao longo do ciclo de vida das estradas, transformando a maneira como é encarado o gerenciamento das infraestruturas viárias. Outrossim, foi possível proporcionar uma compreensão detalhada dos custos e impactos, contribuindo para a comunidade acadêmica, enfatizando a importância fundamental do LCC no gerenciamento estratégico das infraestruturas viárias.

Palavras-chave: Custo do Ciclo de Vida, análise econômica, sustentabilidade, rodovias, infraestrutura de transportes.

ABSTRACT

ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY IN ROAD PROJECTS: THE POTENTIAL OF THE LIFE CYCLE COSTING METHODOLOGY.

AUTHOR: Luan Somavilla da Rosa

ADVISOR: Luciano Pivoto Specht

The application of the Life Cycle Costing (LCC) methodology to roads represents a substantial advance in strategic management in the transportation infrastructure sector. Through a review of the literature, this study addresses the reasons that justify its application, highlighting its economic and sustainable relevance. In the road sector, the conventional consideration of costs is practically restricted to the initial construction phase. However, life cycle analysis reveals a more comprehensive perspective. Through economic analysis, it is shown that LCC offers a detailed understanding of the costs involved at each stage of the road, allowing for an efficient allocation of resources and the identification of strategies that minimize costs over time. In addition, LCC's sustainable approach considers not only financial costs, but also environmental, social and economic impacts, providing more responsible and balanced road management. By basing decisions on a comprehensive analysis of costs throughout the life cycle of roads, LCC stands out as a relevant tool for strategic decision-making. This methodology not only strengthens the financial management of roads, but also promotes a more conscious and sustainable vision of the implementation, maintenance or rehabilitation of roads. Thus, a study focused on the Life Cycle Costing methodology applied to pavements is justified by its ability to optimize resources, minimize costs and maximize economic and environmental benefits throughout the life cycle of roads, transforming the way road infrastructure is managed. Furthermore, it was possible to provide a detailed understanding of costs and impacts, contributing to the academic community by emphasizing the fundamental importance of LCC in the strategic management of road infrastructures.

Keywords: Life Cycle Costing, economic analysis, sustainability, roads, transport infrastructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lógica de decisão para a seleção da estratégia de manutenção.....	15
Figura 2 – Dificuldade de previsão da probabilidade de falhas	15
Figura 3 - Estrutura do(s) plano(s) de gestão de ativos.....	19
Figura 4 - Compensações de custos na propriedade de ativos.	33
Figura 5 - Classificação da manutenção.....	36
Figura 6 - Fases do ciclo de vida dos pavimentos e interação com o ambiente.....	39
Figura 7 - Compensações de custos na propriedade de ativos.	41
Figura 8 - Análise econômica e do ciclo de vida.....	42
Figura 9 - Curva de Degradação do Pavimento.....	50
Figura 10 - Interação entre a feição, as causas e as consequências associadas.	57
Figura 11 - Diagrama esquemático das emissões de CO2 dos transportes no Brasil em 2016.	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	JUSTIFICATIVA.....	11
1.2	OBJETIVOS	12
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	12
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	12
2	HISTÓRICO E EVOLUÇÃO	14
3	LCC - CUSTO DO CICLO DE VIDA	19
4	VARIAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS LIFE CYCLE COSTING, LIFE CYCLE COSTING ANALYSIS E LIFE CYCLE ASSESSMENT	21
5	COMPARAÇÃO ENTRE LCC – CUSTO DO CICLO DE VIDA E MÉTODOS TRADICIONAIS DE AVALIAÇÃO DE CUSTOS	23
6	APLICABILIDADE DA METODOLOGIA DO LCC EM PROJETOS RODOVIÁRIOS	26
6.1	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ANÁLISE DO LCC EM PROJETOS DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE	26
6.2	COLETA DE DADOS E ESTIMATIVA DE CUSTOS EM PROJETOS DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE	29
6.3	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM PROJETOS DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE:.....	30
7	DADOS NECESSÁRIOS PARA ANÁLISE	33
7.1	DADOS DE PROJETO E CONSTRUÇÃO E ELEMENTOS DE CUSTOS	33
7.2	CUSTOS DE MANUTENÇÃO E OPERACIONAIS:.....	35
8	EMISSÕES DE POLUENTES	39
8.1	RECUPERAÇÃO AMBIENTAL.....	40
9	ANÁLISE FINANCEIRA	42
9.1	FLUXO DE CAIXA.....	43
9.2	DINHEIRO NO TEMPO	43
9.3	VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)	44
9.4	TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE (TMA).....	46
9.5	TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	46
9.6	ÍNDICE DE CUSTO-BENEFÍCIO (ICB)	47
10	CONSERVAÇÃO, DEPRECIÇÃO E REMEDIAÇÃO DA RODOVIA	49
11	CICLOS DE DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO	53
11.1	CICLOS CURTOS.....	53
11.2	CICLOS LONGOS	53
12	GERAÇÃO DE PASSIVOS	55

12.1	INTEGRAÇÃO ENTRE LCC E GERAÇÃO DE PASSIVOS RODOVIÁRIOS.....	57
13	MODELOS PARA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA LCC.....	59
13.1	MODELOS GERAIS DE CUSTOS DO CICLO DE VIDA	60
13.1.1	<i>Modelo I:</i>	60
13.1.2	<i>Modelo II:</i>	61
13.1.3	<i>Modelo III:</i>	62
13.1.4	<i>Modelo IV:</i>	63
13.1.5	<i>Modelo V:</i>	64
13.1.6	<i>Modelo VI:</i>	65
13.2	MODELOS ESPECÍFICOS DE CUSTOS DO CICLO DE VIDA.....	67
13.2.1	<i>Modelo I:</i>	67
13.2.2	<i>Modelo II:</i>	68
13.2.3	<i>Modelo III:</i>	69
13.2.4	<i>Modelo IV:</i>	71
13.2.5	<i>Modelo V:</i>	72
13.3	MÉTODO DE ESTIMATIVA DE CUSTOS.....	73
13.3.1	<i>Modelo I:</i>	73
13.3.2	<i>Modelo II:</i>	73
13.3.3	<i>Modelo III:</i>	74
13.3.4	<i>Modelo IV:</i>	74
13.3.5	<i>Modelo V:</i>	75
14	SISTEMAS PARA APOIO DA METODOLOGIA LIFE CYCLE COSTING.....	76
14.1	SOFTWARE OPENLCA – <i>OPEN SOUCER LIFE CYCLE ASSESMENT</i>	76
14.2	SOFTWARE HDM-4 – HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT MODEL.....	78
14.3	DEMAIS SISTEMAS AUTOMATIZADOS.....	79
15	GERAÇÃO DE CARBONO E A METODOLOGIA LCC.....	81
16	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
16.1	CONCLUSÃO FINAL	85
16.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	86
17	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1 INTRODUÇÃO

A malha rodoviária brasileira desempenha um papel de suma importância no contexto socioeconômico e logístico do país, sendo o principal modal para o desenvolvimento estadual e federal, em diversas áreas. Sabe-se que a extensão da malha rodoviária se estende por milhares de quilômetros, segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) (s.d.), a malha se distingue em diferentes jurisdições, tendo um total aproximado de 1.563.351 quilômetros de estradas e rodovias, onde 76.259 km são referentes a rodovias federais, 225.348 km pertencentes a rodovias estaduais e, sendo a mais extensa, as vias municipais, somando um total de 1.261.745 km, esses valores tornam o Brasil a 4ª posição no *ranking* mundial de extensão da malha rodoviária. No entanto, somente 12,4% da malha do país é pavimentada (CNT, 2022). Sabe-se que, grande parte dessas rodovias conectam grandes metrópoles, cidades médias e áreas rurais, facilitando o livre transporte e, também, o comércio interno e externo. Dessa forma, é evidente que a rede viária desempenha um papel multifacetado de integração regional, aliando transporte de produtos, serviços e mercadorias à mobilidade de milhões de cidadãos.

Ao longo das últimas décadas, a malha rodoviária enfrentou mudanças expressivas, atendendo a necessidade de expansão e modernização para que fosse possível suprir às crescentes demandas de frota e da carga de veículos, além de atender as mudanças climáticas. Dessa forma, há certa urgência na criação de medidas que garantam a segurança e, também, a sustentabilidade em seus métodos de construção a manutenção, desde a construção até a conservação e manutenção dessas vias.

A situação atual das vias no Brasil demonstra as dificuldades significativas para implantação, conservação e melhorias, e seu papel crucial no desenvolvimento do país evidencia a necessidade de um método e de abordagens inovadoras para sua gestão e desenvolvimento. Avaliar as dificuldades significativas para implantação, conservação e melhorias da malha rodoviária, torna-se fundamental. Com isso, torna-se emergente a utilização de um método e de abordagens inovadoras para a gestão e desenvolvimento da mesma.

Concomitantemente, a expansão e modernização é importante para que seja possível atender às crescentes demandas, porém, sabe-se que, apenas com recursos financeiros, não é possível quebrar o ciclo vicioso de implantação e manutenção que as rodovias são frequentemente submetidas, em um curto espaço de tempo. Posto isso, se aplicado corretamente para as rodovias, o método intitulado *Life Cycle Cost* (LCC) – do inglês, análise do ciclo de vida – que se trata de uma abordagem analítica que avalia todos os custos associados a um

projeto desde sua concepção até o final de sua vida útil, proporciona uma compreensão técnica e aprofundada dos custos associados à infraestrutura rodoviária. Ademais, contribui para uma temática amplamente abordada neste século: a busca por soluções que levem em consideração aspectos ambientais e sustentáveis em seu planejamento e operação.

À vista disso, o assunto abordado neste trabalho está diretamente relacionado a aplicação do LCC às rodovias brasileiras e sua importância para o entendimento efetivo dos custos associados a construção, operação, manutenção e eventuais reabilitações ou substituições de rodovias. Desse modo, se adequadamente compreendido e aplicado, pela iniciativa pública e/ou privada, as gestões estarão aptas a aplicar seus recursos de forma mais eficiente e segura, pois o método prioriza projeto que, à longo prazo, proporcionarão melhor custo-benefício, otimizando o orçamento proposto para o projeto e reduzindo substancialmente o desperdício de investimentos.

Considerando a ampla aplicação do método, o LCC também se mostra essencial na mitigação de impactos ambientais gerados pela construção das rodovias, possibilitando a avaliação das emissões de carbono, consumo de recursos naturais e humanos, além dos impactos gerados ao longo da vida útil de uma rodovia. Isso é no ponto de vista da preservação do meio ambiente, em um contexto de crescentes mudanças climáticas e da grande incidência de desastres naturais, além da preservação do meio ambiente. Portanto, a aplicação do método não está atrelada somente a gestão econômica e viabilidade de projetos rodoviários, mas também para à redução dos impactos ambientais e ao alcance de um desenvolvimento ecologicamente correto e, acima de tudo, sustentável no setor de infraestrutura viária no Brasil. Esse tipo de estudo é vital para o entendimento de um conceito que, de certa forma, é recente no âmbito rodoviário e, por meio da análise a ser realizada, pretende-se contribuir significativamente para o entendimento mais aprofundado e para a demonstração dos benefícios que o emprego desse método pode trazer aos órgãos responsáveis.

1.1 JUSTIFICATIVA

A extensa malha rodoviária do país desempenha um papel fundamental na conexão entre as regiões e, também, no desenvolvimento econômico. Contudo, tal mobilidade, têm gerado impactos significativos para a infraestrutura dos pavimentos existentes e, simultaneamente, para o meio ambiente. Diante do crescente imperativo de proteção ambiental e do compromisso do Brasil com acordos internacionais sobre o clima, torna-se essencial avaliar de maneira aprofundada sobre o ciclo de vida das rodovias para identificar oportunidades de melhorias

sustentáveis, tanto para a construção de novas estradas, quanto a reabilitação e manutenção das vias já existentes. Além disso, a aplicação do método gera percepções mais factuais para os órgãos e seus gestores, sejam eles públicos ou privados, auxiliando na tomada de decisões, promovendo o desenvolvimento de rodovias mais eficientes, econômicas e ambientalmente corretas.

Portanto, o método oferece uma abordagem holística para compreensão e otimização do impacto das rodovias ao longo do seu ciclo de vida, contribuindo para um desenvolvimento viário expressivo para o país, considerando que o Brasil é detentor da quarta maior malha viária do mundo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral, a partir de uma revisão bibliográfica, apresentar a metodologia *Life Cycle Cost* (LCC – análise do ciclo de vida), explorando e avaliando as abordagens, características, potencialidades, limitações e contribuições desse método. Assim, busca-se evidenciar seus benefícios e sintetizar seus conceitos para instigar futuros estudos de viabilidade e aplicação, sendo capaz de agregar à literatura para futuros estudos de viabilidade e aplicação.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos, são:

- Realizar levantamento de parâmetros econômicos dos recursos e custos a longo prazo, podendo ser utilizado para avaliação do custo total da rodovia ao longo do ciclo de vida;
- Auxiliar a tomada de decisões, com bases sólidas, permitindo que os órgãos públicos e empresas privadas, juntamente com os responsáveis tomadores de decisão comparem diferentes opções de projetos, com e sem a aplicação do método;
- Propor a análise e a quantificação dos impactos ambientais que a não utilização do método pode acarretar e, também, a mitigação dos impactos, fornecendo dados objetivos sobre o tema;

- Avaliar de forma fundamentada as opções de projetos que sejam capazes de abranger o aumento constante no tráfego rodoviário e na urbanização;
- Agregar os fundamentos principais da metodologia do custo do ciclo de vida para a literatura, tornando viável a aplicação do método em futuros estudos de caso.

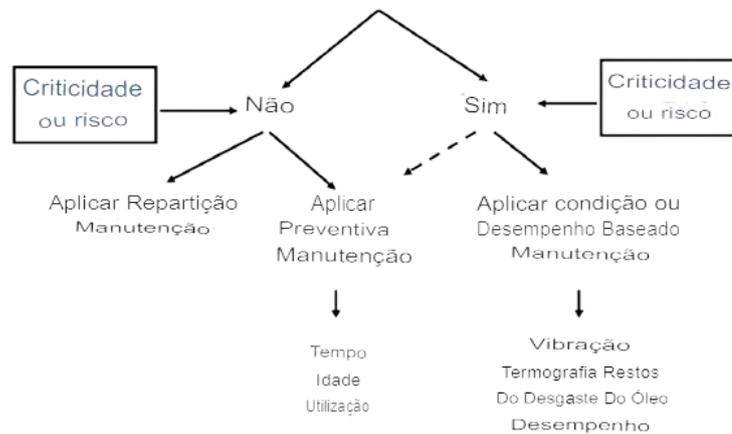
2 HISTÓRICO E EVOLUÇÃO

Durante a evolução da engenharia, em termos gerais, diversos aspectos tornaram-se mais eficazes e modernos, desde a revolução industrial inúmeras mudanças ocorreram, afetaram a forma como a manutenção e instalação de ativos eram planejados e realizados. No entanto, para que fosse possível alcançar uma visão holística na análise do ciclo de vida de um ativo, esse campo enfrentou, durante décadas, uma série de desafios, desde uma corrida lenta para instrumentação de equipamentos e projetos, até mesmo a sistemas básicos para o controle e análise de projetos e sistemas (BROWN; SODALINI, 2013).

Com as adversidades enfrentadas ao longo dos anos, tornou-se necessário analisar que todo ativo, independente da área, deve ter manutenção, visando o aumento de sua vida útil, o que exige uma análise sobre o custo do ciclo de vida do produto em questão. Dessa forma, no contexto histórico, o que se pode considerar como o ponto de partida para o estudo da Avaliação do Ciclo de Vida, remonta a 1969 nos Estados Unidos, quando a Coca-Cola realizou um estudo pioneiro. O objetivo era determinar qual tipo de embalagem para refrigerantes acarretaria menores emissões e demandaria menos recursos em seu processo de fabricação. Essa pesquisa consistiu em um levantamento minucioso das matérias-primas empregadas, dos combustíveis utilizados e das cargas ambientais associadas a cada tipo de embalagem. Esse estudo ficou conhecido como *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA) (CURRAN, 2006).

Outrossim, a manutenção preventiva do ativo surgiu não só para a correção de possíveis falhas, mas também para evitar a perda de equipamentos, o que consolidou um método voltado à mitigação de perda de ativos e o quanto poderiam ser evitadas se analisadas anteriormente, conforme a Figura 1 explica a necessidade de aplicação das manutenções. Consequentemente, julgou-se necessário avaliar a vida útil de sistemas mais complexos, onde, em um primeiro momento, houve um esforço para a coleta de dados e cálculos de custos ao longo do tempo (BROWN; SODALINI, 2013).

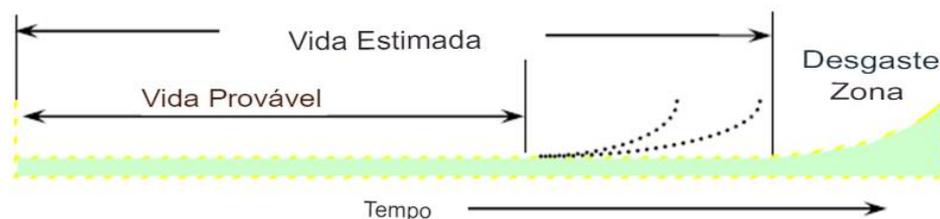
Figura 1 - Lógica de decisão para a seleção da estratégia de manutenção.



Fonte: Adaptado de BROWN; SODALINI, 2013.

Após a criação de uma ideologia de avaliação e análise, levou-se aos setores militares e aeroespaciais, na década de 1960, logo a inserção do avião Boeing 747, a indústria da aviação buscou estratégias voltadas à manutenção dos equipamentos para prolongar sua vida útil. Constatou-se que, quanto mais antigo e sem manutenção um equipamento fosse, maior a probabilidade de falhas, conforme é possível observar na Figura 2. Nesse período, observou-se a dificuldade de mensurar a probabilidade de falha, por um período observou o desenvolvimento de técnicas mais sofisticadas de análise de custo ao longo da vida útil do produto (BROWN; SODALINI, 2013).

Figura 2 – Dificuldade de previsão da probabilidade de falhas



Fonte: Adaptado de BROWN; SODALINI, 2013.

Nesse momento, com a evolução de conceitos de manutenção, por volta dos anos de 1980 e concomitante com o aumento significativo na complexidade das estruturas e sistemas, impulsionado pelas crescentes demandas de um mercado altamente competitivo e pela intolerância a períodos de inatividade, consequentemente, os custos associados à manutenção continuaram em um crescimento exponencial. Este período também viu o surgimento de uma conscientização renovada em relação aos processos de falha, acompanhada pelo

desenvolvimento de melhores estratégias de gestão e pela introdução de novas tecnologias, viabilizando a compreensão do estado das máquinas e componentes. A análise de riscos tornou-se fundamental nesse contexto, enquanto as preocupações ambientais e de segurança ganharam grande relevância, em todos os setores da indústria. Dessa evolução emergiram novos conceitos, tais como monitoramento das condições, adoção de práticas de fabricação *just in time*, implementação de normas de qualidade mais rigorosas, utilização de sistemas especializados e a ênfase na manutenção centrada na confiabilidade (BROWN; SODALINI, 2013).

Ainda segundo Brown e Sodalini (2013), existe uma tendência crescente em reconhecer os custos ao longo do ciclo de vida de um produto ou ativo, compreendendo que o planejamento e a construção de uma indústria ou produtos devem levar em consideração não apenas os custos iniciais, mas também os custos contínuos de manutenção, além dos possíveis gastos associados à desativação e remoção futura da estrutura.

Por conta disso, em meados dos anos 1990, no Reino Unido, surgiu o *The Institute of Asset Management*. Atualmente, a gestão de ativos está recebendo uma atenção considerável por parte da maioria das organizações, o que tem levado à criação de novos setores especializados para a implementação de análises do ciclo e vida e da gestão de ativos. É inegável que haverá um período de exploração e desenvolvimento à medida que essa prática se desenvolve e passa a ser compreendida mais amplamente. A gestão de ativos emerge como uma forma de integrar diversos elementos aparentemente independentes em um sistema unificado que permitirá avançar em direção a um modelo estratégico consolidado (BROWN; SODALINI, 2013).

Dos anos 2000 em diante, com o crescente foco na sustentabilidade, o LCC evoluiu e passou a ser amplamente utilizado, incorporando a base de decisões de instituições, possibilitando a avaliação dos custos financeiros e, também dos impactos socioambientais. Na mesma década, várias instituições de destaque no Brasil integraram a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em suas agendas. O Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (Ibict), focado em informação, uniu-se ao Laboratório Federal da Suíça para Ciência e Tecnologia de Materiais (EMPA) em 2004, visando capacitar profissionais brasileiros e construir uma base de dados nacional de Inventários de Ciclo de Vida (ICV).

Paralelamente, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) estabeleceu a avaliação do ciclo de vida como ponto-chave para a Avaliação de Conformidade de produtos e processos. Em 2005, um livro destacou o desenvolvimento metodológico da ACV na América Latina, ressaltando a contribuição de diversos setores da sociedade, enquanto em

2006 o Ibict liderou um grande projeto, o SICV Brasil, buscando promover um sistema de informação, capacitando na metodologia e se tornando um protagonista no avanço da ACV no país. O Programa Brasileiro de ACV (PBACV) foi lançado em 2010 pelo INMETRO, focando na consolidação de ICVs nacionais, disseminação de informações sobre o Pensamento do Ciclo de Vida e definição de categorias de impacto relevantes. Também nesse ano, foram publicados guias abrangentes sobre ACV pela plataforma europeia EPLCA (ACV, s.d.).

Ademais, com o foco voltado para a sustentabilidade, no início dos anos 2000, o Protocolo de Quioto, originado na III Conferência das Partes da CQNUMC, transformou-se em um tratado global com o propósito de estabelecer acordos entre os Estados-membros para definir metas de redução das emissões de gases do efeito estufa. Ele busca engajar a comunidade internacional na redução desses gases, particularmente nas nações mais poluentes, enquanto promove um crescimento econômico menos impactante para países em desenvolvimento (ZANIOLO; COLZANI, 2008).

Ainda segundo os autores Colzani e Zaniolo (2008), devido à influência histórica das emissões dos Estados industrializados na concentração atual de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, o Protocolo diferencia responsabilidades, categorizando as nações com maior responsabilidade por essas emissões.

Com base nos princípios de responsabilidade comum, porém diferenciada, e do poluidor-pagador, o Protocolo estabelece metas de redução de GEE, isentando os países em desenvolvimento. Sua abordagem vinculativa é inovadora, mas gera conflitos entre as nações desenvolvidas e em desenvolvimento devido à diferenciação nas metas de redução, refletindo as responsabilidades passadas dos Estados industrializados na crise ambiental atual. (ZANIOLO; COLZANI, 2008).

A relação entre o Protocolo de Quioto e a metodologia LCC está na conscientização crescente sobre a importância de considerar não apenas os aspectos econômicos, mas também os ambientais, ao realizar projetos de infraestrutura, como rodovias. A implementação de práticas mais sustentáveis, visando a redução das emissões de gases poluentes, alinha-se aos objetivos do Protocolo de Quioto. Ao adotar a metodologia LCC, os gestores e responsáveis técnicos, podem avaliar não apenas os custos financeiros, mas concomitantemente, os impactos ambientais ao longo da vida útil das rodovias, permitindo uma tomada de decisão mais abrangente e alinhada com as metas de sustentabilidade estabelecidas por acordos como o Protocolo de Quioto.

Isso posto, o custo do ciclo de vida evoluiu ao longo das décadas, passando de uma metodologia inicialmente desenvolvida para avaliação de projetos militares, para uma

ferramenta amplamente difundida, em diversos setores, com ênfase crescente na sustentabilidade, aliada a integração da tecnologia para coleta e análise de dados. Por isso, a contínua utilização do LCC, faz-se necessária para uma gestão eficaz de ativos a longo prazo, além da colaboração direta para tomada de decisões fundamentadas com base no custo total das propriedades, sejam elas quais forem (ZAMPOLLI, 2015).

3 LCC - CUSTO DO CICLO DE VIDA

O Custo do Ciclo de Vida se trata de um conceito difundido em diversas áreas dentro da engenharia, como gestão de projetos, economia e sustentabilidade, conforme visto anteriormente. A partir dessa filosofia, tornou-se possível desenvolver cálculos e análises dos custos totais associados a um tipo de projeto ou ativo, nesse caso, execuções rodoviárias, ao longo da vida útil, desde sua concepção inicial, reabilitação ou até mesmo a reconstrução de vias existentes.

Diante disso, o objetivo primordial e, de certa forma, o mais fundamental do LCC é possibilitar uma ampla visão diante dos custos que estão por trás dos momentos em que antecedem as tomadas de decisões, indo além de um primeiro passo, que seria o custo inicial de implementação ou manutenção de uma rodovia, para uma consideração ampla e sequencial de todos os custos que ocorrerão ao longo do tempo de operação (YOSHITAKE, 1995). Além disso, segundo Marisa Zampolli, no Guia de Gestão de Ativos (2015), trata a gestão de ativos e aplicação do ciclo de vida, como uma estrutura ordenada, seguindo a Figura 3.

Figura 3 - Estrutura do(s) plano(s) de gestão de ativos.



Fonte: ZAMPOLLI, 2015.

Para que seja possível compreender o conceito do LCC, há a importância dividir em pequenos conceitos e componentes que irão consolidar as características finais do tema, segundo Woodward (1997), difundem-se nas seguintes características:

1. Custos Iniciais:

- Trata-se do custo inicial, como custos de aquisição que incluem a avaliação de elementos como terrenos, edifícios, mobiliário e equipamento, além disso, associa-se o

custo ao investimento inicial para suprir as primeiras demandas, como os custos relacionados a impostos, possíveis taxas de importações, fretes e instalação de barracos de campo. Outros custos incluem os custos de instalação das máquinas e os custos de formação para os trabalhadores estarem aptos a operar;

2. Custo de operação:

- São os custos embutidos durante a operação do produto ou do ativo em questão, ao longo de toda a sua vida útil. Esse tópico inclui despesas como mão-de-obra, energia, peças de reposição, insumos para preservação de maquinários e utensílios;

3. Custos de manutenção:

- Abrange os custos relativos à manutenção corretiva e preventiva, oriundos da implementação do maquinário ao seu produto, dessa forma, inclui-se a substituição de peças desgastadas, reparos gerais e específicos em peças, além dos trabalhos necessários para manter os produtos com um bom desempenho ao longo do tempo em que ocorre a operação.

4. Custo de energia:

- Refere-se aos custos de energia necessários para operar um produto ou demais ativos, como o consumo de energia elétrica e combustíveis, no entanto, esse gasto está relacionado apenas a maquinários e ferramentas que necessitam desse meio para o seu funcionamento;

5. Custo de depreciação:

- Representa a perda de valor do produto ao longo do tempo, devido ao desgaste oriundo da utilização dos produtos. Encaixa-se nesse tipo de custo, ferramentas e máquinas que possuem vida útil finita; e

6. Custo de Eliminação:

- São os custos finais para alguns maquinários e instalações, estão englobados os custos para remoção segura de produtos, descarte de sólidos e possíveis contaminantes de forma correta. Além disso, desmontagem de equipamentos e possíveis restaurações ambientais, dependendo do caso, encaixam-se nesse item.

4 VARIACÃO ENTRE AS METODOLOGIAS LIFE CYCLE COSTING, LIFE CYCLE COSTING ANALYSIS E LIFE CYCLE ASSESSMENT

No presente trabalho, a abordagem central estará direcionada a metodologia *Life Cycle Costing* (LCC), dado o foco particular pelo qual origina esse trabalho, onde, a mesma, analisa o método LCC para que seja utilizado em futuras análises de custos ao longo do ciclo de vida de empreendimentos rodoviários, sejam eles referentes a órgãos públicos ou concessões por parte de empresas privadas. Dessa forma, é possível afirmar que todo o embasamento teórico é passível de aplicação em setor privado e público, porém, cada um com suas especificidades, sejam financeiras por meio de limitações orçamentárias ou financiamentos, no entanto, evidencia-se que ambos deveriam usufruir da metodologia para maior assertividade de intervenções realizadas em âmbito rodoviário, respeitando a peculiaridade de cada projeto.

Para mais, é importante salientar que, dada a natureza interdisciplinar que originou a metodologia, conceitos associados ao *Life Cycle Cost* (LCC), como o *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) e ao *Life Cycle Assessment* (LCA) serão incorporados. Isso se deve à similaridade entre essas metodologias, porém, é importante ressaltar que, em diferentes literaturas consultadas, alguns pesquisadores e autores consideram o LCC como base fundamental que serve de alicerce para as abordagens do LCCA e LCA. Assim, ao longo dessa pesquisa, encontram-se referências que relacionam e descrevem tais métodos de forma interligada, o que, de certa forma, enriquece o entendimento sobre a gestão de custos e impactos ao longo do ciclo de vida dos empreendimentos rodoviários.

Dessa forma, faz-se necessária uma breve abordagem a respeito da definição de cada metodologia, para que o leitor, de forma clara e concisa, consiga discriminar as pequenas diferenças que circundam as metodologias. Em primeiro, tem-se a metodologia *Life Cycle Costing* (LCC), que é o ponto de partida desse trabalho, o LCC foca predominantemente nos custos associados a um projeto desde sua concepção até o término de sua vida útil. Essa metodologia não leva em consideração apenas os custos iniciais de construção, reativação ou reabilitação de rodovias, mas também os gastos operacionais, de manutenção e os custos de desmontagem ou disposição ao final da vida útil do seu empreendimento, bem como o tratamento dos materiais oriundos da geração de passivos de rodovias. É uma ferramenta crucial para a tomada de decisões, pois ajuda a identificar a melhor opção entre as diferentes alternativas de investimento, levando em conta os custos totais ao longo do tempo. (WOODWARD, 1997).

Já o *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) é uma abordagem mais específica oriunda e que se insere dentro do *Life Cycle Costing*. Ela se concentra na análise dos custos ao longo do ciclo de vida, com ênfase particular na comparação entre diferentes estratégias de empreendimentos e projetos, materiais ou tecnologias, para que seja possível identificar a opção mais econômica, ou seja, é uma análise/diagnóstico daquilo que é feito majoritariamente pelo LCC. A metodologia LCCA, é uma evolução econômica do método anterior, aqui são utilizadas técnicas de análise de custo mais aprofundadas, para avaliar as alternativas sob diferentes cenários, considerando variações nos custos de capital, custos operacionais e de manutenção (MEARIG; MORRIS, 2018).

Na mesma via e, por mais que os outros métodos consideram fortemente o aspecto sustentável, a metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA) que, por vezes, é mais abrangente e vai além dos aspectos puramente econômicos, investigando de forma completa os impactos ambientais associados a um produto, serviço ou processo ao longo do ciclo de vida completo de um ativo. O LCA avalia desde a extração de matérias-primas, passando pelas fases de produção, utilização e descarte, considerando aspectos como emissões de gases de efeito estufa, consumo de recursos naturais, entre outros impactos ambientais (InnProBio, s.d.).

Por fim, é possível interpretar que existe distinção entre essas metodologias e, reside na sua ênfase particular em diferentes aspectos do ciclo de vida de um empreendimento: custos financeiros, custos específicos e impactos ambientais. Compreender a similaridade e as nuances é crucial para adotar uma abordagem mais embasada e abrangente na avaliação de projetos, nesse caso, aplicados especificamente a infraestrutura de transportes, onde se considera não apenas os custos imediatos, mas também os impactos a longo prazo, sejam eles econômicos ou ambientais.

5 COMPARAÇÃO ENTRE LCC – CUSTO DO CICLO DE VIDA E MÉTODOS TRADICIONAIS DE AVALIAÇÃO DE CUSTOS

Por se tratar de um método relativamente novo no Brasil, é cabível uma breve comparação entre o método LCC e os métodos tradicionais de avaliação de custos sendo analisado de forma geral. Dado a premissa que no campo da gestão de ativos e investimentos, como é o caso de empresas privadas que disputam licitações e concessões, a avaliação de custos é uma etapa crucial para a tomada de decisões responsáveis e bem informadas, principalmente em casos de rodovias que, por vez, estão deterioradas e com urgência de manutenção ou, até mesmo, reabilitação de todas as suas camadas. No entanto, a forma como os custos são avaliados, pode gerar um impacto significativo nas escolhas estratégicas dentro de uma organização. Visto esse contexto, o LCC propõe uma abordagem que, de certa forma, revoluciona a forma como a análise dos custos é encarada, principalmente, em abordagens tradicionalmente conhecidas.

Enquanto métodos convencionais se preocupam, principalmente, em custos iniciais e de implementação, o LCC aborda uma perspectiva mais vasta, considerando todo ciclo de vida de um ativo, abordando desde os custos iniciais, similar aos métodos tradicionais, porém, elevando as análises para construção, operação, manutenção e, até mesmo, descarte ou reabilitação. Essa premissa de análise, torna-se fundamental escrutinar destacar as diferenças substanciais entre o LCC e os métodos tradicionais, em termos de decisões sustentáveis e financeiramente sólidas.

Segundo o autor Nakagawa (1991), responsável por diversos estudos em prol da gestão estratégica de custos, menciona uma filosofia que é aplicável na metodologia do LCC, onde o autor cita que a avaliação dos fatores que influenciam os custos sugere a viabilidade de utilizar diversos fatores para distribuir os gastos entre os diferentes setores ou produtos, o que, por sua vez, proporciona uma informação mais precisa para a cadeia dos processos. É válido destacar que a utilização do método do custeio baseado em processos é imperativa.

Dessa forma, cabe um efêmero comparativo, em tópicos, sobre alguns pontos importantes a serem destacados entre as diferenças dos métodos tradicionais, para o LCC. Autores que abordaram temas relacionados à análise de custos, métodos de avaliação e conceitos fundamentais do LCC, como Robert S. Kaplan e Steven R. Anderson, 2007; B. S. Dhillon, 2010; Walter Klöpffer e Birgit Grahl, 2014; Jan Emblemsvag, 2003; Abdelhalim Boussabaine e Richard Kirkham, 2008. Sendo assim, é possível mensurar as distinções:

1. Escopo Temporal:

- Métodos Tradicionais: Os métodos tradicionais de avaliação de custos costumam centralizar as suas ações nos custos iniciais como a aquisição de materiais e primeiras etapas construtivas. Significa dizer que, apesar de serem considerados alguns custos iniciais, custos futuros de possíveis manutenções, operações e eventuais renovações, como o caso de maquinários defasados ou com necessidade de troca, são ignorados e, dessa forma, não contabilizados nos custos finais.
- LCC: O método adota uma perspectiva a longo prazo, isso quer dizer que, ao longo do tempo o custo é calculado com base na vida útil do ativo, desde as etapas iniciais até as etapas finais, conforme supracitado anteriormente.

2. Avaliação de Alternativas:

- Métodos Tradicionais: Por mais que, normalmente, existam algumas alternativas para comparação entre projetos e serviços, os métodos mais tradicionais não facilitam a comparação eficaz de diferentes alternativas de projeto, materiais ou estratégias de manutenção e operação.
- LCC: O LCC permite a avaliação e comparação de diversas alternativas, auxiliando na identificação da solução mais econômica e sustentável ao longo do ciclo de vida do ativo.

3. Transparência Financeira:

- Métodos Tradicionais: Os métodos tradicionais, muitas vezes por não gerarem mais alternativas e não possibilitar uma visão mais ampla da vida útil do ativo, acabam ocultando custos futuros, significa dizer que, ao longo da execução de um projeto rodoviário, o mesmo, poderá gerar surpresas orçamentárias que não estão previstas, dificultando a alocação de recursos.
- LCC: Por promover uma visão ampla ao longo do ciclo de vida, o mesmo possibilita uma transparência financeiramente mais completa, documentando o máximo de custos ao longo da vida útil, auxiliando na alocação de recursos em possíveis despesas inesperadas, de forma mais precisa e eficaz.

4. Qualidade e Sustentabilidade:

- Métodos Tradicionais: Esses métodos, por vez que tendem a priorizar a minimização de custos, conseqüentemente, possibilitam a construção de projetos de qualidade inferior a necessária, por mais que atendam as normas, a durabilidade, qualidade e visão sustentável, podem ser afetadas.

- LCC: O LCC incentiva a construção de ativos de qualidade superior e com grande durabilidade, o que pode aumentar a vida útil e reduzir os custos de manutenção ao longo do tempo, ademais, com a diminuição de manutenção, conseqüentemente, tem-se uma menor mobilização de campo, evitando que maquinários sejam utilizados e, que as emissões de gases sejam reduzidas.
5. Avaliação Ambiental e Social:
- Métodos Tradicionais: Por serem métodos mais tradicionais e conservadores, geralmente não consideram os impactos ambientais e sociais dos ativos ao longo do tempo. Apesar de existirem normas que regem e protegem o meio ambiente e a população, principalmente quando se fala em construção de rodovias, por vezes, não se consideram os anos posteriores à implementação.
 - LCC: Por ter uma visão mais holística e voltada, também, para o meio ambiente, o LCC incorpora em sua filosofia, considerações ambientais e sociais, auxiliando a identificar práticas mais sustentáveis, capazes de reduzir de forma substancial os impactos negativos de uma implementação rodoviária.

Em síntese, a análise comparativa entre o LCC e os métodos tradicionais de avaliação de custos revela claramente a vantagem do LCC em proporcionar uma compreensão mais global dos custos ao longo do ciclo de vida de um ativo. Essa abordagem se mostra fundamental para embasar escolhas estratégicas que vão além dos custos iniciais, permitindo a consideração de fatores como durabilidade, qualidade, impacto ambiental e social, e a gestão mais eficaz dos recursos financeiros e, também, humanos. Portanto, o LCC se destaca como uma ferramenta essencial para a administração de ativos de longo prazo, contribuindo para a eficiência e a sustentabilidade.

Além disso, o método *Life Cycle Costing* representa uma abordagem altamente embasada teoricamente para a avaliação de projetos de rodovias. A incorporação de princípios da engenharia econômica, engenharia mecânica, visão para escolhas que, também, satisfaçam interesses sociais, além de outros campos relevantes que ofereçam uma base sólida para tomadas de decisões em projetos de infraestrutura rodoviária. A análise profunda e a incorporação de externalidades o destacam em relação aos métodos convencionais, que muitas vezes carecem de fundamentações teóricas e abrangência na avaliação de projetos.

6 APLICABILIDADE DA METODOLOGIA DO LCC EM PROJETOS RODOVIÁRIOS

A gestão eficaz dos projetos rodoviários desempenha um papel crucial no desenvolvimento das infraestruturas rodoviárias, garantindo a mobilidade e a conectividade entre as regiões. Contudo, essa gestão não se limita à construção de rodovias e implementação das novas, mas sim, sobre gerir a rodovia durante a sua vida útil, antes das manutenções preventivas e, até mesmo, durante as manutenções corretivas, possibilitando uma gerência de suprimentos e material humano, mais eficaz, abordando, inclusive, um descarte correto dos passivos gerados, em casos de reabilitações de rodovias.

Dado o pressuposto, insere-se o conceito do LCC, para evitar redução da vida útil e de gastos defasados e desnecessários no campo da infraestrutura, uma vez que o Brasil se encontra, aproximadamente, quatro décadas atrás de países desenvolvidos como Estados Unidos, Japão e Portugal, em termos de metodologias para projetar rodovias (CNT, 2017). Nesse contexto, definem-se as etapas passíveis de aplicação do LCC nos projetos rodoviários, a fim de analisar os pontos cruciais a serem considerados, conforme o escopo apresentado a seguir.

6.1 Definição dos parâmetros de análise do LCC em projetos de infraestrutura de transporte

Para esse primeiro passo na aplicação do método LCC, especificamente em projetos de infraestrutura de transporte de transporte, envolve a definição de alguns parâmetros essenciais que guiam a análise. De certa forma, essa etapa se torna de suma importância para o desenvolvimento de toda a cadeia de análise do método, uma vez que é base e auxílio para o um estudo eficaz.

- Horizonte de Análise: Representa o período de tempo ao longo do qual os custos da infraestrutura serão avaliados. É fundamental que a equipe de projetos de concessionárias privadas ou órgãos públicos, escolha um horizonte de análise apropriado para aplicação, que normalmente é determinado pela vida útil da infraestrutura, visto que a vida útil depende de variáveis como materiais utilizados, métodos de dimensionamento específicos e apropriados para cada rodovia, etc. É válido ressaltar que o pavimento executado com revestimento em concreto asfáltico, no Brasil, costuma ter uma vida útil estimada entre 8 e 12 anos (CNT, 2017). Além disso, a estimativa de vida útil entre os diferentes tipos de pavimento varia e, por conta

disso, é importante que seja analisada melhor perspectiva dentre todas as possibilidades analisadas (ARAÚJO, 2016).

Para que seja possível criar uma perspectiva de análise de uma longa vida útil, o responsável técnico tem que levar em consideração alguns fatores técnicos, como:

- Tipo de pavimento: O tipo de pavimento escolhido tem interferência direta na durabilidade e, conseqüentemente, na vida útil que deverá atingir. Para isso, deve-se analisar pavimentos asfálticos convencionais, pavimentos de concreto, ligantes que compõe a mistura asfáltica, modificados com polímeros, que irão garantir maior resistência à flexão e estabilidade térmica e, possivelmente, entregarão uma maior vida útil. (NUNES, 2018). Leva-se em consideração, também, materiais para camadas inferiores que garantam maior resistência desde os primeiros dias de vida e a longo prazo.
- Estimativa de tráfego: O volume de tráfego e o tipo de carga (veículos leves, pesados, transporte de cargas especiais) são fatores preponderantes e que tem impacto direto na deterioração do pavimento (DNIT, 2006b). Dessa forma, é fortemente necessário haver a estimativa de tráfego, além de projeções de crescimento de tráfego para os anos seguintes a implementação.
- Clima: As condições climáticas locais de onde será implementada a rodovia devem ser consideradas, pois variações de temperatura e níveis altos de precipitação, têm um impacto significativo na durabilidade do pavimento. De acordo com PROADAPTA (2021), pelas condições climáticas desfavoráveis atuais, é essencial adotar medidas de adaptação para mitigar riscos e reduzir impactos, principalmente na infraestrutura de transporte. Por isso, a análise de risco climático é fundamental para identificar os riscos, avaliar oportunidades presentes e futuras, e direcionar as medidas de adaptação necessárias.
- Padrões de desempenho: Especificações como rugosidade, capacidade de suporte, durabilidade, valores de indicadores dentro dos permitidos por norma, sinalizações verticais e horizontais em perfeitas condições (ANTT, 2016). Entre outros padrões de desempenho são importantes, pois irão variar com base na classe da rodovia e a estimativa de expectativa de uso, fatores que, influenciam diretamente na estimativa de vida útil do pavimento.

Com base nessas condições técnicas, reflete-se a expectativa e vida útil do pavimento projetado, que é sujeito a manutenção preventiva e corretiva, nesse contexto, o horizonte projetado e avaliado como o ideal. Assim, permite-se ponderar os custos envolvidos na construção do pavimento, nas manutenções periódicas, eventuais recapeamentos e/ou reabilitações, ao longo da sua vida útil, garantido que a infraestrutura seja mantida em condições seguras e eficientes, ao longo do período estimado.

- Taxa de desconto em projetos de infraestrutura: Segundo Mearig e Morris (2018), no livro *“Life Cycle Cost Analysis Handbook”*, esse tópico é essencial porque reflete o valor do dinheiro e o poder de compra ao longo do tempo. De forma sucinta, a taxa de desconto considera que um valor disponível hoje é mais valioso do que o mesmo valor, no futuro. Essa taxa é aplicada para trazer todos os custos e benefícios futuros de um projeto ao valor presente. Desse modo, essa abordagem é relevante para decisões financeiras, uma vez que permite a comparação de custos e benefícios ao longo do tempo, além de estimar investimentos necessários.

- Taxas de juros de mercado: Uma abordagem comum internacionalmente, é basear a taxa de desconto na taxa de juros de mercado. De certa forma, isso reflete o custo de oportunidade de investimento em projetos de infraestrutura, como a construção de novas rodovias ou a reabilitação completa, com a entrada de concessionárias em rodovias concedidas por licitações que, anteriormente, eram estaduais ou nacionais, negócio comum entre diversas empresas privadas do ramo rodoviário.
- Risco do projeto: projetos de infraestrutura podem apresentar riscos para empresas privadas que entram em licitações, uma vez que, órgãos públicos não conseguem manter as rodovias em boas condições de utilização. Assim sendo, projetos de maior risco podem exigir uma taxa de desconto mais alta para refletir a incerteza associada. Esse risco pode estar relacionado à volatilidade econômica, riscos operacionais ou eventos externos imprevistos. Cabe ressaltar que por diversas vezes, empresas abandonam o investimento em meio ao processo de reconstrução da rodovia concedida, por problemas financeiros como um todo ou pela dificuldade para manter o investimento ativo, dada a necessidade de cumprimento das exigências que os órgãos fiscalizadores realizam.
- Revisão periódica das taxas: É importante que as taxas sejam revisadas com frequência, devido à instabilidade econômica do país, à medida que as condições econômicas e os riscos do projeto evoluem ao longo do tempo. Uma taxa de desconto fixa normalmente não reflete com precisão a mudança que ocorrerá ao longo do investimento e tempo de

contrato ou edital de licitação. Por isso, é fundamental que a taxa seja reavaliada e reajustada ao longo do período.

6.2 Coleta de dados e estimativa de custos em projetos de infraestrutura de transporte

A coleta de dados e a estimativa de custos em projetos de infraestrutura de transporte devem ser conduzidas de forma metódica e fundamentada na literatura técnica aliada a estudos de campo. Os responsáveis por essa etapa, devem buscar informações de fontes confiáveis para base de preços, como o SICRO, que é um sistema de custos, sobre todo o conhecimento técnico necessário para fazer a elaboração de orçamentos de obras e serviços do DNIT, por exemplo, para analisar os orçamentos de obras públicas que estejam sendo solicitadas pelos órgãos (ORÇAFASCIO, 2013). Alguns tópicos importantes a serem destacados que podem fazer parte desse item:

- Levantamentos topográficos: É necessário que seja utilizado técnicas de topografia de alta precisão e tecnologias modernas, como drones e sistemas de informações geoespaciais. Somado a isso, o levantamento topográfico fornece informações detalhadas sobre o terreno em que a rodovia será construída. Ademais, revela características como elevações, curvas de nível, vegetação, corpos d'água, áreas de preservação ambiental e obstáculos naturais ou artificiais presentes no trajeto planejado, interferindo diretamente, na velocidade que será estipulada para a via (DNIT, 2010). Vale lembrar que, essa etapa deve ser bem analisada e bem construída, tentando sempre manter a topografia original do local, uma vez que possíveis erros podem levar a necessidade de realizar novos traçados e novos levantamentos, gerando custos extras e que não estavam planejados, sendo antagônico a filosofia do LCC.

- Características Geotécnicas: Segundo o Manual de Projeto Geométrico é substancial que seja realizado investigações geotécnicas para coleta de dados e informações sobre as características do solo e da geologia local, incluindo amostragens de solo, ensaios de penetração, ensaios de sondagens, para casos de novas rodovias, que serão implementadas (DER/SP, 2006). Esses fatores são cruciais na definição dos tipos de materiais que irão incorporar as opções de estruturas que serão consideradas para a execução. Essa análise é necessária para uma escolha segura dos materiais, além do estudo de viabilidade logística de cada material, compondo um orçamento mais seguro e com menos chances de riscos negativos ao investimento.

- Dimensionamento: O ideal é que seja feito dimensionamentos com métodos e *softwares* atuais, os quais aceitariam maior entrada de dados e, conseqüentemente, resultados

mais seguros e eficazes, garantindo que se tenha um pavimento durável, sem a necessidade de reforços estruturais e, conseqüentemente, gastos exacerbados e não contabilizados nas etapas anteriores. É válido mencionar que o Brasil, recentemente deixou de utilizar técnicas inadequadas para a atual demanda, sendo dimensionado através do método DNER/1966, simulando os efeitos de um eixo padrão de 80kN (DNER, 1981). Porém, atualmente, têm-se métodos mais eficazes, como o método MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos Flexíveis), que realiza verificações e o dimensionamento mecânico-empírico de estruturas de pavimentos asfálticos (MeDiNa, 2021), esse método leva em consideração análises computacionais mais eficazes, que entrega, como resultado, a possibilidade de desenvolver projetos mais eficazes com grande resistência e entrega de maior vida útil, situação que se encaixa perfeitamente no método LCC.

- Normas e regulamentações: Consultar as normas e regulamentações técnicas aplicáveis, com especificações de materiais, aplicações, normas de qualidade, garantindo que infraestrutura seja projetada e construída de acordo com os padrões necessários e esperados. Conforme supracitado, têm-se as normas ABNT NBR ISO 14040 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura, ABNT NBR ISSO 55000 – Gestão de Ativos – Visão Geral, princípios e terminologia, NBR ISSO 55001 – Sistema de Gestão de Ativos, que fornecem um escopo que fundamentam a metodologia discutida no presente trabalho.

Por essa razão, analisar os custos unitários de materiais e mão de obra com base em dados reais e índices de custos disponíveis, torna-se imprescindível. Além de utilizar modelos e técnicas conhecidas no campo da engenharia, para estimar os custos ao longo do ciclo de vida da infraestrutura, considerando a construção, operação, manutenção e eventuais reabilitações. Ao utilizar projetos similares ou conhecidos, é possível implementar a metodologia do LCC, levando em consideração cada detalhe no presente momento e, tão importante quanto analisar o presente, projetar o futuro dos custos.

6.3 Avaliação de desempenho em projetos de infraestrutura de transporte:

Essa etapa é fundamental para que a aplicação do LCC seja eficaz em projetos de infraestrutura. A partir dessa avaliação que se obtêm os dados e informações necessárias para realizar análises técnicas mais fundamentadas, considerando diversos fatores que influenciam diretamente no desempenho da infraestrutura. Nessa etapa, uma ampla gama de aspectos técnicos deve ser considerada, algumas delas são:

- Previsão de tráfego: A avaliação do desempenho começa com a previsão de tráfego. Isso envolve demandas futuras, levando em conta fatores como crescimento populacional, mudanças na economia e na logística, conforme a projeção de tráfego com base em séries históricas. Para que se tenha dados mais concisos, modelos de estudo e previsão de tráfego são frequentemente utilizados para projetar a demanda, explicando o comportamento dos diversos tipos de tráfego (DNIT, 2006). A precisão dos dados coletados é primordial para determinar o dimensionamento adequado da infraestrutura e para evitar o sub ou superdimensionamento, o que pode acarretar em custos operacionais mais altos, o que não é interessante para aplicação do método. Isso assegura que a rodovia seja projetada para a capacidade correta, evitando desgastes na pavimentação, como trincas, ondulações plásticas, afundamentos de trilho de roda por problemas estruturais e manutenções corretivas prematuras, ocasionando custos dispensáveis.

- Avaliação do estado do pavimento: A qualidade funcional e estrutural do pavimento não impacta somente na segurança, e sim nos custos operacionais na via, como o consumo de combustível e manutenção de veículos que, por sua vez, impacta diretamente na geração de carbono para o meio ambiente. Somado a isso, é fundamental para o desempenho de uma rodovia, quanto mais próximo de uma superfície regular e sem defeitos, mais segura a via será, por conta disso, realizar avaliações regulares do estado do pavimento é essencial. Para tal, envolve o uso de técnica de monitoramentos, como ensaio de deflexão do pavimento, perfilômetro a laser e análise de imagens, para determinar o grau de deterioração do pavimento, além de obter os valores de índice de gravidade global, irregularidades longitudinais e afundamentos de trilha de roda, além das deflexões do pavimento, condicionando as decisões a serem tomadas (AGUIAR, 2017). Com base nessas avaliações e dados registrados, é possível prever quando as intervenções deverão ocorrer, sejam elas manutenções preventivas ou corretivas. Esses estudos são muito utilizados por concessionárias, para realizar o monitoramento semestral e anual das rodovias licitadas, dessa forma, mantendo os relatórios em dia e com total noção de como se encontra o estado do pavimento, é possível ter controle sobre os valores investidos. É válido mencionar que essas informações são fundamentais para tomada de decisões quanto às intervenções a serem tomadas em uma rodovia (DNIT, 2006a).

- Análise de impactos ambientais: A infraestrutura de transporte não pode ser avaliada apenas com base em critérios econômicos. A sustentabilidade e os impactos ambientais também são fundamentais. Nesse contexto, é necessário avaliar o consumo de recursos naturais, emissão de poluentes, cargas de CO₂, impactos sobre ecossistemas e outras questões ambientais.

Técnicas como o LCCA são frequentemente usadas para quantificar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da infraestrutura (ARAÚJO, 2016).

Para novos projetos, o uso do LCCA, considerará a extração de materiais, o processo construtivo, transporte de materiais, uso de energia e os impactos ambientais associados. Ainda de acordo com Araújo (2016), isso permite identificar as oportunidades de redução dos impactos ambientais, pois torna possível mensurar o quão prejudicial está sendo o novo empreendimento, para o meio ambiente. Dessa forma, atinge diretamente na escolha de materiais de construção mais sustentáveis ou a otimização do projeto para reduzir o consumo de recursos naturais e, se possível, sempre tentar utilizar materiais recicláveis, como o caso da reutilização do material fresado.

- Eficiência energética: A eficiência energética é uma preocupação importante em projetos. A atenção sobre a otimização do consumo de energia em sistemas de iluminação, semáforos, entre outros, deve existir, uma vez que esses complementos fazem parte de uma rodovia segura, porém, com grande demanda energética (ARAÚJO, 2016).

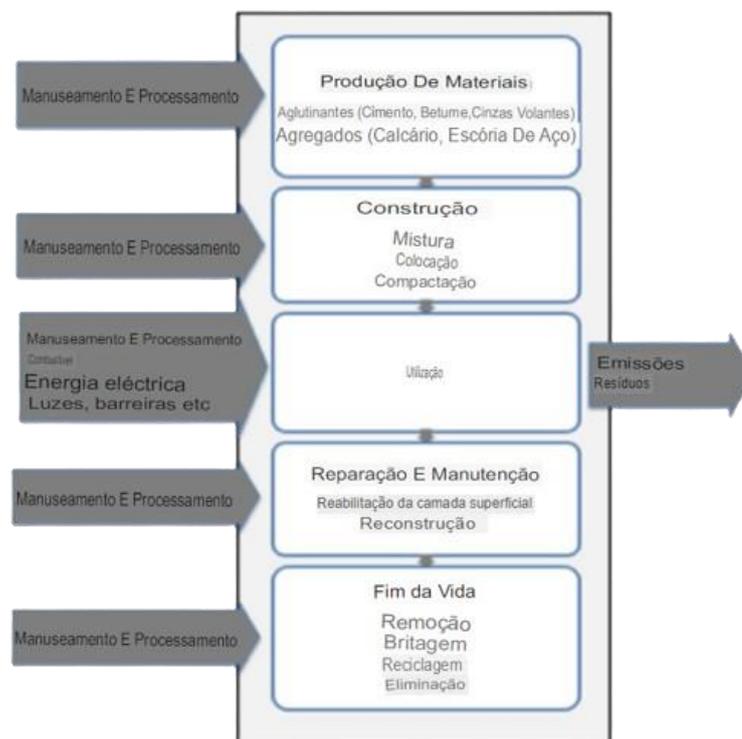
Sabe-se que para aplicação de um novo sistema de iluminação em uma rodovia, é feita uma análise técnica detalhada que irá comparar diferentes tecnologias de iluminação, levando em conta a eficiência luminosa, vida útil da lâmpada e custos de operação, postes com energia gerada através de placas solares e afins, além do tipo de material que foi feito o pavimento e sua idade (ARAÚJO, 2016).

Essa etapa demonstra como a avaliação de desempenho em projetos de infraestrutura de transporte é uma etapa crítica que envolve análises detalhadas de vários aspectos. Tais análises fornecem dados valiosos para a tomada de decisões informadas e concisas, além da otimização do desempenho da infraestrutura ao longo do seu ciclo de vida.

7 DADOS NECESSÁRIOS PARA ANÁLISE

Após a análise dos dados supracitados, sabe-se que utilizar o LCC é uma alternativa eficaz e que propõe diversas melhorias, em campos variados. Dessa forma, cabe explorar os itens que rotineiramente, fazem parte da avaliação de um corpo técnico, porém, agora, aplica-se a filosofia do LCC, para que seja possível visualizar de forma mais concreta, o que seria possível abordar com o método que está sendo estudado. Seguindo aos autores Anastasiou e Liapis (2015), na Figura 4, tem-se todas as etapas de custos na gestão dos ativos.

Figura 4 - Compensações de custos na propriedade de ativos.



Fonte: Adaptado de ANASTASIOU; A LIAPIS, 2015.

7.1 Dados de projeto e construção e elementos de custos

- Geometria da rodovia: É notório que o LCC vai além dos custos iniciais da construção de uma rodovia, considerando, inclusive, a segurança que determinada rodovia proporciona ao longo da sua vida útil. Segundo Nogueira (1995), deve ser priorizado a opção que entregue uma rodovia com uma geometria que favoreça a planimetria, altimetria, superelevação, superlargura, curvas não acentuadas ou idênticas que, conseqüentemente, evitarão grandes índices de frenagem e desaceleração, mantendo bons níveis de segurança. Dessa forma, aplica-se o LCC

para uma tomada de decisão mais assertiva, excluindo a possibilidade de execução de projetos que não favoreçam tais fatores.

- Tipo de pavimento: Conforme mencionado anteriormente, a metodologia de avaliação do ciclo de vida, examina a escolha do tipo do pavimento em relação à sua vida útil, custos de manutenção, ciclos de curta ou longa duração, além da resistência que se busca encontrar após o desenvolvimento do projeto executivo. Segundo Araújo (2016), há a necessidade de pré-estabelecer uma escolha entre os pavimentos flexíveis, rígidos e semirrígidos, além disso, ao optar por materiais que entreguem um revestimento mais durável, com a utilização de uma mistura com a dosagem ideal para cada aplicação, aliado a prática de construção que irá maximizar a vida útil, como maquinários em pleno funcionamento, sem quaisquer evidências que precarizem a operação, é nítido que o método irá ajudar a evidenciar a melhor escolha. A comparação com os materiais de pavimentação menos duráveis, revela o motivo pelo qual o LCC consegue se aplicado no campo rodoviário, dado o pressuposto de consideração de custos a longo prazo.

- Custos de mão de obra e produção: Além dos custos diretos de mão de obra e equipamentos, o método trabalhado considera os impactos dessas escolhas na eficiência da construção e operação, que incidirão diretamente na durabilidade da rodovia. O uso de técnicas construtivas eficientes e equipamentos modernos, juntamente a uma base sólida de dados técnicos, demonstrarão o quão possível é reduzir os custos operacionais e de manutenção durante a vida útil estimada de projeto (GUIMARÃES et. al., 2021). Segundo Ballard e Howell (1997), a concepção da produção se fundamenta na ideia de atribuir tarefas que possam ser integralmente realizadas pelas equipes de produção. Isso visa reduzir incertezas e prevenir interrupções nos fluxos de trabalho, garantindo a continuidade operacional com os recursos disponíveis. Observa-se que são fatores essenciais para aplicação da metodologia, dada a necessidade de avaliação dos custos de mão de obra e a preocupação de uma linha de produção efetiva, sem gargalos em seu sistema, evitando possíveis gastos inesperados.

- Custos de Construção: Segundo Pedrozo (2001), de forma sintetizada, os gastos associados à fase de construção da infraestrutura, inclui custos de estudos de viabilidade técnica, econômica, ambiental, possíveis limpezas e destocamentos de árvores, construções de obras de arte especiais, reflorestamentos de árvores nativas e áreas desapropriadas, além de serviços de projetos e engenharia, aquisição de materiais, mão de obra, aluguel de equipamentos, empreiteiros e empreendimento para a implementação da rodovia.

- Taxas de inflação de custos e depreciação de ativos: Segundo Dhillon (2010), o conceito de depreciação refere-se à redução de valor. No contexto dos equipamentos de

engenharia, encontra-se distintos tipos de depreciação: a depreciação monetária, tecnológica, física e funcional. Cada uma dessas formas de depreciação aborda diferentes aspectos que influenciam na diminuição do valor dos ativos ao longo do tempo.

O cuidado com esses reajustes garante que os custos estimados sejam realistas e atualizados, independentemente do tempo de projeto e execução, tornando as previsões mais precisas e evitando qualquer tipo de diferença que não foi estimada no começo do projeto. Embora a depreciação anual varie ao longo dos anos, o fator de equilíbrio decrescente, que é uma porcentagem fixa, permanece constante ao longo da vida útil do equipamento, item ou ativo. Esse método implica em amortizar o custo do equipamento ou item no início de sua vida útil, utilizando uma taxa acelerada, o que resulta em encargos anuais progressivamente menores nos anos finais de serviço do equipamento ou item. (DHILLON, 2010).

7.2 Custos de Manutenção e Operacionais:

- Custos Operacionais: O método *Life Cycle Costing* auxilia a otimizar as despesas operacionais ao longo do ciclo de vida da rodovia. Em casos de rodovias que passaram por processo de licitação e devem abrir praças de pedágios, assume-se que o LCC pode colaborar para a escolha de uma praça de pedágio eficiente, com diferentes sistemas, desde um sistema tradicional, com cobranças manuais e cancelas automáticas ou, até mesmo, a aplicação de um novo sistema de pedágio, denominado *free-flow*, que garantiria um fluxo livre para os usuários e a tarifa seria cobrada proporcionalmente à distância percorrida, sem a necessidade de praças físicas (CNT, 2023).

Segundo Araújo (2016), nessa etapa estão englobados os custos de operação, referentes a energia, como eletricidade e combustível, seguros para os colaboradores e maquinários, custos administrativos e outros custos relacionados ao funcionamento da operação da construção da infraestrutura. É possível observar que se trata de mais um caso onde o LCC pode ser aplicado, ao estudar a possibilidade de utilização de diferentes sistemas, garantem que os veículos trafeguem com mais segurança e sem interrupções, sem custos para manter uma praça de pedágio ativa, demonstrando como essas ações resultam em economias substanciais ao longo do ciclo de vida.

- Custos de Manutenção: Uma análise baseada na filosofia do LCC permite planejar e orçar de forma eficiente aquilo que deverá sofrer manutenção de rotina ou preventiva, desde a execução inicial até a entrega final do produto, identificando os momentos ideais para que seja realizado intervenções, tendendo a prolongar a vida útil do pavimento. No aspecto dos custos,

é crucial que qualquer intervenção de manutenção busque alcançar o menor custo global. Isso decorre da análise dos custos operacionais, os quais estão relacionados tanto aos custos resultantes da manutenção propriamente dita quanto aos custos decorrentes da ausência dela.

Além disso, a questão da disponibilidade assume importância significativa, visando garantir uma operacionalidade otimizada dos equipamentos. Isso é realizado ajustando as paradas programadas e minimizando as interrupções por falhas, contribuindo assim para manter a produção regular e cumprir prazos estabelecidos (DIONÍSIO, 2020). Portanto, o método permite o desenvolvimento de planos estratégicos e eficientes de manutenção ao longo da vida útil, auxiliando a maximizar a eficiência dos gastos e da operação e minimizando os custos desnecessários não calculados, além de quantificar o impacto dessas escolhas, revelando os benefícios financeiros da abordagem.

Do mesmo modo, a segunda geração da evolução da manutenção, conforme descrita pela ONU e citada por Tavares (1999), apresenta uma classificação que traz uma abordagem sobre os tipos de manutenção preventiva e corretiva. Essa categoria inclui, por exemplo, custos associados à manutenção, antes que a rodovia apresente defeitos severos para que sejam necessárias intervenções mais profundas e, conseqüentemente, mais caras. Isso abrange a manutenção de pavimentos como o recapeamento, reparos, selagem de trincas, além de inspeções estruturais, como o método FWD (*Falling Weight Deflectometer*).

Essas categorias são agrupadas sob o termo "planejada", indicando que a manutenção corretiva também possui um certo nível de planejamento, fator preponderante na aplicação do método LCC. Sob essa classificação, as atividades de manutenção são consideradas para intervenção no equipamento durante seu funcionamento, inatividade ou mesmo antes de sua falha (como reparo por fadiga). De acordo com a Figura 5, é possível observar a classificação adotada para os diferentes critérios de manutenção.

Figura 5 - Classificação da manutenção.



Fonte: TAVARES, 1999.

Para estar de acordo com aquilo que se considera conservação, restauração e melhoramento/manutenção, o Diário Oficial da União aborda, na Portaria N° 289 (PORTARIA, 2013), no seu artigo 2º, inciso XIII, parágrafo 1º, no conceito de conservação da plataforma da rodovia, estão:

- “Limpeza, capina e roçada da faixa de domínio”;
- “Remoção de barreiras de corte”;
- “Recomposição de aterros”;
- “Estabilização de taludes de cortes e aterros”;
- “Limpeza, reparos, recuperação e substituição de estruturas e muros de contenção;
- Tapa-buracos”;
- “Remendos superficiais e profundos”;
- “Reparos, recomposição e substituição de camadas granulares do pavimento, do revestimento betuminoso ou das placas de concreto da pista e dos acostamentos”;
- “Reparos, substituição e implantação de dispositivos de sinalização horizontal e vertical”;
- “Reparos, substituição e implantação de dispositivos de segurança”;
- “Limpeza, reparos, substituição e implantação de dispositivos de drenagem, tais como bueiros, sarjetas, canaletas, meio fio, descidas d’água, entradas d’água, boca de lobo, bocas e caixas de bueiros, dissipadores de energia, caixas de passagem, poços de visita, drenos”; e
- “Limpeza, reparos e recuperação de obras de arte especiais, tais como pontes, viadutos, passarelas, túneis e cortinas de concreto”.

No que diz respeito ao conceito de restauração das vias existentes, seguindo ainda, a Portaria N° 289 (PORTARIA, 2013), no seu artigo 2º, inciso XIII, parágrafo 2º, está, além dos itens anteriormente citados, o item:

- “Recuperação ou substituição de estruturas e muros de contenção”.

Por fim, para o conceito de melhoramento das vias e, seguindo Portaria N° 289 (Brasil, 2013b), no seu artigo 2º, inciso XIII, parágrafo 3º, estão listados os itens:

- “Alargamento da plataforma da rodovia para implantação de acostamento e de 3º faixa em aclives”;
- “Estabilização de taludes de corte e aterros”;
- “Recomposição de aterros”;
- “Implantação das vias marginais em travessias urbanas”;

- “Substituição ou implantação de camadas granulares do pavimento, do revestimento betuminoso ou placas de concreto, da pista e acostamentos”;
- “Implantação ou substituição de dispositivos de sinalização horizontal e vertical”;
- “Implantação ou substituição de dispositivos de segurança”;
- “Implantação ou substituição de dispositivos de drenagem, tais como bueiros, sarjetas, canaletas, meio-fio, descidas d’água, entradas d’água, bocas de lobo, bocas e caixas de bueiros, dissipadores de energia, caixas de passagem, poços de visita e drenos”;
- “Implantação, substituição ou alargamento de obras de arte especiais, tais como pontes, viadutos, passarelas, túneis e cortinas de concreto”;
- “Implantação ou substituição de estruturas e muros de contenção”; e
- “Implantação de edificações necessárias à operação da via, tais como bases operacionais, praças de pedágio e balanças rodoviárias”.

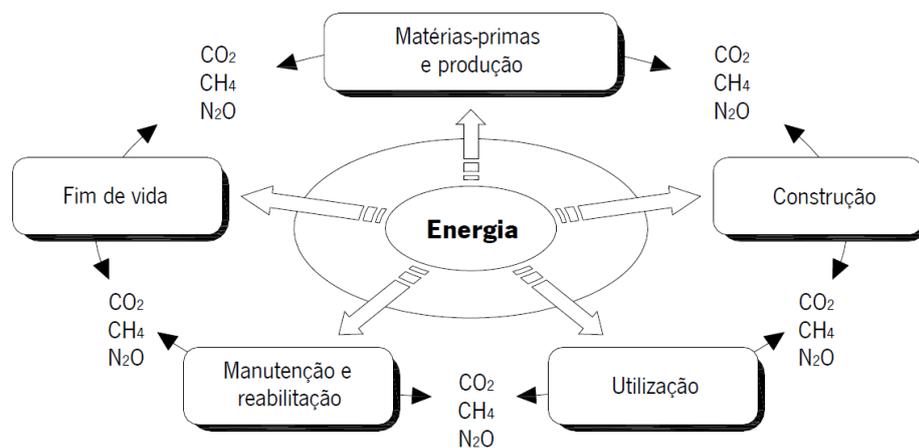
8 EMISSÕES DE POLUENTES

Qualquer empreendimento de construção, especialmente no caso de pavimentação de estradas, gera um impacto ambiental significativo. Durante a fase de construção, a própria atividade resulta em um impacto direto decorrente do consumo de energia e recursos naturais, além da emissão de gases para a atmosfera. No entanto, os efeitos desse impacto continuam a se manifestar ao longo de toda a operação da infraestrutura, tornando-se mais evidentes durante as atividades de conservação, renovação e demolição (ARAÚJO, 2016).

Ainda de acordo com Araújo (2016), a metodologia do LCC analisa os impactos ambientais e emissões de poluentes, por conta disso, possibilita a mitigação das emissões de CO₂ e poluentes que serão lançados na atmosfera ao longo da vida útil da rodovia.

Seguindo a linha referente às emissões para a atmosfera, há uma atenção especial voltada para o CO₂, CH₄ e N₂O devido ao seu potencial em provocar o efeito estufa, contribuindo para as mudanças climáticas. De certa forma, por conta de o LCC possibilitar a escolha entre projetos que entreguem a máxima eficiência e que esteja aliado aos cuidados com o meio ambiente, leva-se em consideração a opção de projeto que seja capaz de minimizar esses impactos e que contemple números menores de emissões de poluentes, dado a essência quantitativa do método, que permite identificar a energia consumida bem como os resíduos gerados. Na Figura 6, o autor Araújo (2016) exemplifica o ciclo de emissão de gases poluentes provenientes, principalmente, da queima de combustíveis fósseis em veículos e máquinas que dependam dessa fonte para o seu funcionamento.

Figura 6 - Fases do ciclo de vida dos pavimentos e interação com o ambiente.



Fonte: ARAÚJO, 2016.

Interpreta-se que o método de avaliação do ciclo de vida considera os custos para implementar medidas que irão mitigar os impactos, como a utilização de tecnologias de controle de poluição e programas de reabilitação ambiental. Com isso, garante-se à conformidade com regulamentos ambientais e de acordos assumidos entre as nações, conforme mencionado. Concomitantemente, ao responsabilizar-se por maiores preocupações ambientais, as empresas envolvidas, sejam privados ou públicas, terão analisado os cuidados com impactos ambientais imprevisíveis, como alguma forma de problema ambiental, como desmoronamento em regiões de corte, etc.

A análise mais aprofunda fornece a documentação necessária como a licença ambiental, contratos de concessão, autorizações específicas, certificações e regularizações da empresa, licença para operação, de acordo com um compliance regulatório, que está relacionado ao risco de se ter licenças de operação, operando em ambientes cada vez mais regulados, onde as empresas mantêm uma estrutura eficaz de governança, onde a mesma auxilia no cumprimento de uma ampla condição de obrigações legais e regulatórias (PWC, s.d.).

8.1 Recuperação Ambiental

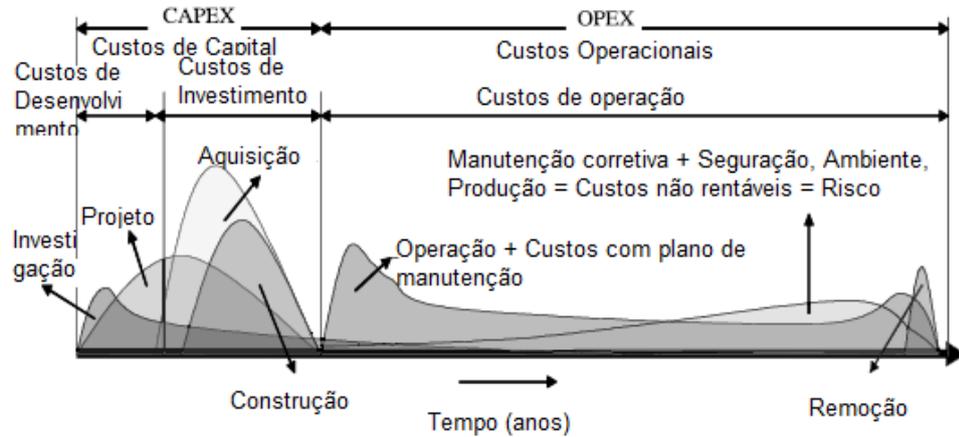
A análise do LCC leva em consideração os custos de recuperação ambiental, incluindo a remediação de solos contaminados, além do replantio de vegetação nativa que, por ventura, foi removida do seu lugar originário. Também, quantifica-se a consequência das medidas de recuperação, reduzindo os impactos ambientais e, além de tudo, minimizando os custos, assunto que é bastante evidenciado ao longo da aplicação do LCC.

Outrossim, a sustentabilidade é um conceito amplo que oferece diversas oportunidades de intervenção nos pavimentos rodoviários, visando práticas mais sustentáveis em várias frentes. Aspectos como a reciclagem de pavimentos, a reutilização de resíduos industriais, especialmente provenientes da construção, e a implementação de processos para reduzir emissões gasosas e o consumo de energia são focos comuns nesse contexto. Apesar da importância inquestionável desses aspectos na fase de construção, é necessário ampliar a análise para outras etapas do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários, garantindo uma abordagem mais abrangente e holística (ARAÚJO, 2016).

É válido ressaltar que, a aplicação do método contribui para a sustentabilidade da rodovia a longo prazo, desde as etapas iniciais de operação, quando as etapas de manutenção preventivas e corretivas, garantindo os cuidados necessários em prol do meio ambiente.

Segundo Márquez (2009), existem custos que englobam todos os itens anteriores, mas, também, leva em consideração as etapas de desativação/remoção, segundo a Figura 7:

Figura 7 - Compensações de custos na propriedade de ativos.



Fonte: Adaptado de MÁRQUEZ, 2009

9 ANÁLISE FINANCEIRA

Sabe-se que o método *Life Cycle Costing* se concentra na análise dos custos durante todo o ciclo de vida de um projeto rodoviário, como já foi discutido no presente trabalho. Inclui-se todas as fases, desde o planejamento executivo, construção, operação e eventuais manutenções e reabilitações. Dessa forma, alguns indicadores importantes devem ser considerados em análises econômicas-financeiras, relacionadas e fundamentadas com os princípios da matemática financeira. Tais indicadores, têm o intuito de ponderar o capital investido pela empresa e embasar as decisões de projetos, criando argumentos mais sólidos para que seja tomada uma escolha entre as opções analisadas. Esse estudo financeiro, alia-se a conceitos fundamentais do LCC, que é oriundo de diversas filosofias, incorporando todos os custos associados, pois avalia ao longo do tempo o fluxo de caixa e permite monitorar o avanço da implementação ou recuperação das rodovias, facultando a análise do fluxo de caixa de forma saudável para a empresa.

Ainda segundo Zampolli, no Guia de Gestão de Ativos (2015), gerir os ativos essenciais ao longo de seu ciclo de vida é fundamental para a gestão eficaz desses elementos e demanda a utilização de critérios técnicos e econômicos para embasar as decisões. A Figura 8 ilustra uma análise do ciclo econômico de um ativo.

Figura 8 - Análise econômica e do ciclo de vida.



Fonte: ZAMPOLLI, 2015.

9.1 Fluxo de caixa

Esse tópico está relacionado a um controle financeiro que é necessário para se ter um manejo completo de entradas e saídas de valores, em uma empresa. Com isso, proporciona-se a visualização do fluxo de caixa, permitindo a gestão financeira eficiente, assegurando o cumprimento de todas as obrigações financeiras, além da capacidade de tomar decisões mais assertivas que irão preservar a sustentabilidade econômica do projeto e operação (JUNQUEIRA, 2018).

Somado a isso, um fluxo de caixa saudável e realista assume um papel central na análise de qualidade, uma vez que a avaliação da viabilidade de um projeto depende intrinsecamente dos registros de entrada e saídas financeiras associadas ao projeto em questão, pois somente assim, o método LCC consegue ser incorporado de fato, tendo o total controle do que é feito para que se tenha uma base financeiramente sólida (GITMAN, 2010).

Os fluxos do caixa costumam seguir uma estrutura que se inicia com um alto desembolso inicial, seguido por uma série de entradas ao longo do tempo, nesse caso, é o melhor cenário para aplicação do método em questão. Por outro lado, com métodos mais tradicionais, o fluxo de caixa não convencional envolve múltiplos desembolsos ou investimentos que não estavam sendo contabilizados, resultado em taxas de retorno em intervalos diretos e não garantindo o sucesso do investimento no ativo.

9.2 Dinheiro no Tempo

O conceito de dinheiro no tempo é fundamental dentro da matemática e engenharia financeira, sendo essencial para análises e tomadas de decisões financeiras mais embasadas. Esse conceito parte do pressuposto de que o valor e o poder de compra de determinada quantia monetária, varia significativamente ao longo do tempo devido aos fatores como a taxa de juros, inflação e o risco.

Para que seja possível realizar investimentos com um bom retorno financeiro, sabe-se que é necessário se privar de consumir o dinheiro em determinado momento, essa renúncia em consumi-lo, é recompensada futuramente, a depender do tempo de investimento. Por conta disso, ao aplicar determinado valor monetário, o valor investido é remunerado por uma taxa de juros pré-determinada, compensando a perda e abdicção da utilização do dinheiro no momento inicial do investimento (BALARINE, 2004).

No âmbito financeiro, a avaliação do dinheiro no tempo se concentra em uma taxa de juros, que ajusta os valores futuros com o intuito de torna-los comparáveis aos valores presentes, auxiliando e tornando uma tomada de decisão mais vantajosa e criteriosamente analisa. Para efeitos de comparação, é essencial que todas as quantias estejam referenciadas em um mesmo período temporal (TORRES, 2014). Dessa forma, todos os fluxos de caixa precisam ser equalizados em um único ponto, em uma mesma época temporal, antes de serem agregados a determinados investimentos e submetidos a análises de viabilidade. Assim, a fórmula matemática ajusta o valor futuro para o presente (GITMAN, 2010):

$$VF = VP (1 + i)^n \quad (1)$$

Em que:

VF = valor futuro;

VP = valor presente;

n = período de tempo;

i = taxa de desconto.

Essa taxa gerada no valor investido, denomina-se custo de oportunidade, que serve para idealizar o real custo de oportunidade que pode ser perdido ao não se optar por determinado ativo, onde calcula-se a taxa de rentabilidade do investimento que deixou de ser feito (ONZE INVESTIMENTOS, 2020). Por conta disso, ao associar rodovias que estão em trâmites licitatórios como investimento em ativos, deve-se ponderar os valores que serão investidos, considerando o valor aportado com o valor que será gerado como retorno, uma vez que, esse retorno, será para um futuro distante, pois normalmente, ao investir em rodovias, a concessionária deve investir um valor considerável para deixar a rodovia adequadamente dentro dos padrões solicitados, dado a condição que, somente assim, poderá cobrar tarifas para locomoção nessas rodovias. Ademais, caso o rendimento da aplicação supere a rentabilidade do investimento que está sendo analisado, é mais vantajoso investir o capital do que prosseguir com o projeto avaliado (PEREIRA, 2017).

9.3 Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido assume uma posição primordial no âmbito das avaliações financeiras para orientar escolhas mais assertivas em investimentos de longo prazo, como é o

caso de projetos rodoviários. Isso se deve ao fato de que o VPL tem a capacidade de quantificar o potencial de lucro relativo ao empreendimento, levando em consideração as variações do valor do dinheiro no tempo e projetando o poder de compra com o mesmo valor, com relação ao presente e futuro.

Além disso, esse indicador é uma ferramenta que ajuda a compreender o valor do dinheiro futuro no presente. Basicamente, é como se fosse feita uma análise temporal no campo financeiro, trazendo os retornos de um investimento para o momento atual, considerando uma taxa de juros específica e descontando o investimento inicial. Isso ajuda a avaliar o quanto esse dinheiro valeria nos dias atuais, além de ser uma maneira inteligente de tomar decisões financeiras (COUTINHO, 2020).

Os resultados que o Valor Presente Líquido apresenta, conforme já foi mencionado, auxiliam e servem como norte para que as tomadas decisões sejam mais assertivas. Se o VPL for maior que zero, significa que os benefícios do investimento irão superar os custos, indicando que, ao analisar isoladamente o VPL, é uma boa ideia seguir em frente e entrar no investimento ou no processo licitatório de rodovias. Antagônico a esse cenário, se o VPL for menor que zero, é um sinal de que talvez seja necessário repensar a entrada no investimento ou reconsiderar as alternativas de projeto. Aliás, quando se compara vários projetos, como o método LCC sugere, torna-se evidente que dentre aqueles projetos com resultados positivos, é sensato optar pelo que apresenta o maior VPL, conforme orientado por Torres (2014). Para demonstrar o que foi explicado, tem-se a seguinte equação matemática:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - FC_0 \quad (2)$$

Em que:

FC_0 = investimento inicial do projeto;

FC_t = fluxo de caixa, ou seja, entradas e saídas de caixa;

i = taxa mínima de atratividade (TMA);

t = período.

9.4 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

A Taxa Mínima de Atratividade desempenha um papel fundamental ao determinar o limiar mínimo que um investimento deve alcançar para ser considerável viável e atrativo para entrar no negócio. Em tese, é o ponto de referência que define a porcentagem mínima necessária para que a rentabilidade do investimento no projeto escolhido supere as demais opções de projeto analisadas, tornando-o uma escolha favorável para a concessionária entrar no negócio.

Por conta disso, sabe-se que a Taxa Mínima de Atratividade está intrinsicamente ligada a conceitos como custo de oportunidade, níveis de risco e custo de capital. Conforme Gitman (2010) menciona, a TMA pode ser determinada por meio de modelos que consideram características do mercado e da empresa. Alternativamente, o responsável pela decisão pode estabelecer essa taxa de forma subjetiva, com base em sua experiência própria e conhecimento de mercado.

9.5 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno é uma métrica financeira que é calculada a partir das projeções de fluxo de caixa, que é essencialmente uma estimativa das receitas geradas por um investimento em ativos ao longo do período de tempo, quando o seu VPL é igual a zero. De forma concisa, a TIR é usada para demonstrar se um projeto é viável ou não, sendo uma ferramenta amplamente empregada na gestão financeira de empresas, ajudando a determinar se investir em um determinado projeto é uma decisão acertada ou possui grandes riscos. Quanto maior a TIR, mais atraente é o investimento (WARREN MAGAZINE, 2023).

Calcular a TIR pode ser um processo difícil para análise de investimento projetos para uma empresa, pois envolve uma incógnita que não pode ser determinada de forma direta. Para chegar em um valor ideal, a recomendação de analistas é a utilização de ferramentas como planilhas, *software* e afins, especialmente quando se trata de fluxo de caixa muito altos em diferentes períodos, que é exatamente o que acontece em execuções rodoviárias, uma vez que se trata de valores consideráveis, independente da etapa operacional que se encontra.

Do ponto de vista econômico, pode-se pensar na TIR como uma taxa que remunera o capital investido (TORRES,2014). Essa taxa se torna ainda mais valiosa quando comparada com a TMA, que estabelece o ponto de referência a partir do qual um investimento se torna lucrativo e, para complementar, a TIR amplia essa visão, indicando que o projeto é ideal quando sua TIR supera o custo de capital (TMA).

9.6 Índice de Custo-Benefício (ICB)

O Índice de Custo-Benefício é uma ferramenta fundamental na Engenharia Econômica e mais uma das auxiliaadoras na tomada de decisões relacionadas a investimento em projetos. Destina-se a avaliar a eficiência e a viabilidade econômica de um projeto ou iniciativa, especial em contextos de órgãos públicos e de infraestrutura (DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018).

A ideia principal por trás do ICB é bastante simples: comparar os benefícios esperados de um projeto com seus custos ao longo do tempo. Essa comparação é realizada em termos de valor presente, o que significa trazer todos os custos e benefícios para um único ponto de referência comum, geralmente o valor presente. Isso se torna essencial porque determinado valor presente, vale menos do que determinado valor futuro.

O ICB é frequentemente utilizado em decisões de investimento em infraestrutura, projetos governamentais e programas de desenvolvimento econômico. Permite, também, aos decisores comparar diferentes alternativas e determinar qual delas proporcionará o melhor retorno financeiro para a sociedade. No entanto, é importante reconhecer que a análise de custo-benefício é complexa e requer estimativas precisas, considerando tanto os aspectos quantitativos quanto os qualitativos, associados a um projeto, desde os custos com projetos técnicos de engenharia até a etapa de entrega do produto final. Portanto, é essencial a compreensão dos princípios subjacentes e apliquem métodos confiáveis para uma análise sólida e confiável.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2018), há uma equação que rege o ICB:

$$ICB = \frac{(Custos\ Fix.\ +Custos\ Oper.\ +Custos\ Econc.)}{Garantia\ Física} \quad (3)$$

Dessa forma, a interpretação do ICB é direta, sendo maior que um, os benefícios do projeto superam os custos ao longo do tempo, tornando o projeto economicamente viável e vantajoso para o órgão. Sendo menor que um, implica que os custos superam os benefícios de investimento, o que pode indicar que o projeto não é economicamente viável para se ingressar.

Em resumo, o método *Life Cycle Costing* representa uma abordagem altamente embasada teoricamente para a avaliação de projetos de rodovias. A incorporação de princípios da engenharia econômica, engenharia mecânica, visão para escolhas que, também, satisfaçam interesses sociais, além de outros campos relevantes que ofereçam uma base sólida para tomadas de decisões em projetos de infraestrutura rodoviária. A análise profunda, a

consideração de múltiplas dimensões e a incorporação de externalidades o destacam em relação aos métodos convencionais, que muitas vezes carecem de fundamentações teóricas e abrangência na avaliação de projetos.

10 CONSERVAÇÃO, DEPRECIÇÃO E REMEDIAÇÃO DA RODOVIA

De acordo com a metodologia LCC, considera-se a degradação progressiva do pavimento ao longo do tempo, portanto, realiza-se uma conexão direta com a aplicação do método que está sendo estudado. Após a conclusão da construção de determinada rodovia, é comum observar tal degradação, influenciada por fatores como tráfego, condições climáticas, entre outros. Esse processo resulta na deterioração gradual da qualidade estrutural e funcional da rodovia. Assim, torna-se fundamental adotar estratégias específicas para preservação da qualidade da via. Segundo Araújo (2016), essas estratégias podem seguir uma abordagem mais preventiva, envolvendo intervenções mais frequentes, porém de menor escala, ou assumir um caráter mais esporádico, com intervenções realizadas quando o pavimento atinge um estado de degradação considerável, exigindo abordagens mais complexas e de mais alto valor financeiro.

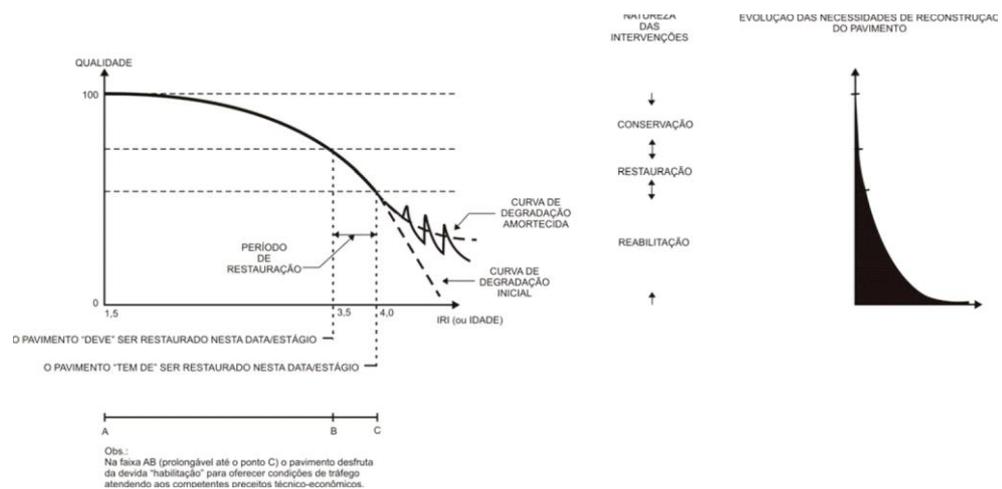
Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006a), alguns conceitos são fundamentais de serem explorados dado as diferenças entre as terminologias, são eles:

- Conservação Rodoviária: Conservação Rodoviária engloba todas as atividades regulares, periódicas e de urgência voltadas para a preservação das condições técnicas e operacionais das rodovias e suas estruturas, mantendo os padrões de qualidade estabelecidos e alinhados com a otimização econômica do "Custo Total de Transporte". Essas ações são essenciais e devem ser planejadas e implementadas de forma contínua ao longo de cada fase de vida do pavimento. No entanto, tornam-se custosas quando o ciclo de vida do pavimento é atingido ou ultrapassado, momento em que é necessário proceder com a reabilitação do pavimento (DNIT, 2006a);
- Recuperação do pavimento através de sua reabilitação: Trata-se de um procedimento destinado a pavimentos que, mediante avaliação por critérios temporais ou índices de desempenho, tenham excedido consideravelmente o estágio final de seu ciclo de vida, evidenciando falhas irreversíveis tanto em sua funcionalidade quanto em sua estrutura - perdendo, assim, sua capacidade de operação adequada. Esse processo se embasa em um projeto de engenharia específico, seguindo as diretrizes estabelecidas nos documentos que regem os "Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários" (DNIT, 2006c). A partir da condição residual do pavimento existente e considerando os padrões de tráfego previstos para o novo ciclo, determina-se a solução a ser adotada. Normalmente, essa solução envolve o recapeamento do pavimento existente e, para extensões mais substanciais, pode incluir

a reconstrução do pavimento - uma abordagem que tende a ganhar predominância à medida que aumenta o intervalo entre o fim do ciclo de vida do pavimento e a execução efetiva das obras de reabilitação (DNIT, 2006a).

Ainda segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006a), a curva de degradação do pavimento, exposta na Figura 9, auxilia a interpretar o que seria o desempenho ideal de uma rodovia e, as necessidades de possíveis intervenções, independentemente de sua natureza.

Figura 9 - Curva de Degradação do Pavimento.



Fonte: DNIT, 2006a.

A definição das estratégias de conservação ao longo do ciclo de vida da rodovia é de extrema importância. Conforme Chehovits e Galehouse (2010), tratamentos preventivos têm a capacidade significativa de reduzir o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa quando comparados às abordagens tradicionais de reabilitação e reconstrução.

Concomitante a isso, depreciação e remediação são fatores importantes em diversos campos, desde investimento monetários, até na gestão de ativos, incluindo rodovias e demais infraestruturas. Além disso, são assuntos considerados na aplicação do método LCC. A depreciação está associada na diminuição do valor da rodovia ao longo do tempo devido ao uso, desgaste e possíveis obsolescências. Já a remediação, abrange as atividades de restauração ou melhoramento da rodovia para que seja possível estender a vida útil ou até mesmo, reabilitar rodovias com índice de gravidade global de alto valor, onde, esse índice, caracteriza a condição em que o pavimento está no momento das avaliações (DNIT 006, 2003).

A teoria da depreciação está fundamentada em princípios econômicos que levam em consideração que todos os ativos, de alguma forma, irão perder valor ao longo do tempo, através

do seu uso (DE CARVALHO, 2004). Em infraestrutura rodoviária, a depreciação pode ser abordada como em outros setores, de forma linear ou acelerada. Nesse caso, tratando-se de rodovias, subentende-se que a depreciação linear assume que o ativo perde valor de forma constante ao longo da sua vida útil, enquanto a depreciação acelerada reconhece que o ativo pode perder valor de forma mais acelerada nos primeiros anos após a construção (LIMA, 2007). Esse método de depreciação é apropriado para rodovias, dada a intensidade inicial de uso, desde o primeiro dia e a exposição sofrida perante as condições climáticas.

A remediação é necessária ser feita pela necessidade de manter a rodovia em condições seguras e operacionais. Isso envolve analisar e reparar os danos evidentes, mas também prevenir a deterioração futura. A análise de remediação está ancorada em avaliações técnicas que consideram a condição atual da rodovia, analisando fatores que sejam perceptíveis pelos usuários, como vibrações, necessidade de variação intensa de velocidade por conta das condições da via. (AVALOS, 2005).

Para recuperação de um pavimento, existem diferentes abordagens para que seja possível garantir a sua durabilidade. Uma técnica bastante utilizada envolve reforçar a estrutura, adicionando uma ou mais camadas betuminosas sobre o pavimento já existente. No entanto, essa simples ação de adicionar novas camadas, pode acarretar em uma série de problemas, como restrições de altura em locais com túneis ou viadutos, a reflexão de trincas da antiga camada para a nova em casos de não utilização de uma camada antirreflexão de trincas, além de afetar a drenagem e a formação de degraus nas divisas entre faixa e acostamento. Além disso, com o acréscimo de revestimento, pode ser necessário elevar as tampas das caixas de visita ao longo da rodovia, tendo que ajustar as cotas de acesso às propriedades adjacentes (ARAÚJO, 2016).

Ainda de acordo com Araújo (2016), existe outra abordagem para remediação de pavimentos flexíveis, onde envolve fresar áreas severamente danificadas e substituí-las por misturas betuminosas novas, porém, gerando passivos. Após esse reparo localizado, uma ou mais camadas betuminosas são aplicadas em toda a extensão da área a ser reabilitada. Esse processo pode incluir a utilização de uma interface retardadora para evitar a propagação de fissuras do pavimento antigo para as novas camadas realizadas. Também é possível adotar técnicas mais conservadoras, como a selagem de fissura ou utilização de camadas mais simples que tenham o objetivo de melhorar as condições funcionais do pavimento em estado inicial de degradação ou melhorar as características superficiais para retardar ou minimizar intervenções mais significativas na rodovia.

Quando os pavimentos atingem um estágio crítico de degradação, surge a necessidade de demolição parcial ou total, resultando na geração de resíduos. O transporte desses resíduos

é feito, muitas vezes, para um aterro sanitário, negligenciando regras de descarte, além de normas ambientais, subestimando significativamente, o impacto ambiental envolvido no descarte de resíduos oriundos do pavimento. De acordo com Chiu (2008), esses resíduos são muitas vezes vistos como um recurso que está sendo destinado para lugares errados, onde o autor destaca a importância de considerar a reutilização ou reciclagem desse material. Nesse contexto, a alternativa de reciclar o pavimento existente se destaca, permitindo a reutilização dos materiais do pavimento e aprimorando sua capacidade de suporte (ARAÚJO, 2016). Cabe ressaltar que, a reutilização desse material é um item considerado no LCC, enquanto é realizado as análises e opções de implementação ou reabilitação das rodovias.

Analisando a teoria fundamentada por Carvalho (2004), Lima (2007) e Avalos (2005), somado a utilização da Norma DNIT 006/2003, cabe a interpretação e aplicação da metodologia do LCC, onde o mesmo, na fase de planejamento, leva em consideração custos de construção somado aos custos operacionais e de manutenção que são esperadas ao longo da vida útil do ativo (WOODWARD, 1997). Portanto, permite-se interpretar, que o LCC considera, também, além do custo inicial, a perda de valor anualmente. Na remediação, o LCC incorpora os custos de intervenções corretivas e preventivas, que são fundamentais para a preservação do valor da rodovia.

Ademais, análises técnicas fazem parte de uma premissa para utilização do LCC, onde envolvem a coleta de dados precisos para criação de cenários que tornem capaz de avaliar o desempenho do ativo, segundo Woodward (1997), nesse caso, a avaliação do desempenho rodoviário ao longo do tempo. Essa verificação é frequentemente empregada para determinar o impacto das variáveis que circundam uma rodovia, como as mudanças repentinas no volume de tráfego que, alteram significativamente na velocidade dos veículos, tratando-se de uma característica extremamente difícil a ser definida, conforme Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006b), ou até mesmo, o aumento no custo dos materiais utilizados para remediação ou reabilitação.

Portanto, pode-se afirmar que assuntos como depreciação e remedição são considerados dentro da estrutura do LCC, para garantir uma gestão eficiente do ciclo de vida da rodovia. A aplicação desse conceito permite aos responsáveis técnicos tomar decisões mais informadas, visando a sustentabilidade e a eficiência econômica de longo prazo, onde o autor Woodward (1997), traz a eficiência econômica como item fundamental para aplicação do LCC. Tem-se, então, que a utilização das práticas do LCC, aliada a uma teoria fundamentada, fornece uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas na manutenção e conservação das rodovias.

11 CICLOS DE DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

11.1 Ciclos Curtos

Conforme citado anteriormente, segundo a Confederação Nacional do Transporte (2017), menciona que os pavimentos costumam ter vida útil estimada entre 8 e 12 anos. Através desse dado, cabe uma discussão entre a possibilidade de se ter ciclos de maior duração, com a aplicação do LCC.

O pavimento de ciclo mais curto, é frequentemente utilizado, uma vez que seu valor inicial tende a ser mais baixo. Para que seja possível manter os custos mais baixos, utilizam-se materiais de menor durabilidade e especificações menos rigorosas. Significa dizer que, as camadas de concreto asfáltico serão feitas com menos espessura ou com materiais de menor desempenho e, conseqüentemente, menos resistentes. Além disso, projeções e estimativas erradas de carga atuante, são fatores que reduzem significativamente a vida útil do pavimento (ALBANO, 2005).

Interpreta-se que, por meio da utilização de materiais com menor qualidade, mais defeitos surgirão e, por conta disso, recapeamentos e intervenções deverão acontecer frequentemente. Isso implica em altos custos operacionais com manutenções e mobilização de mão de obra humana. Fator que é antagônico a metodologia do LCC, dada a necessidade de consideração de um ativo de qualidade e sem a necessidade de grandes intervenções ao longo do uso, considerando os custos subsequentes aos iniciais. (BROWN; YANUCK, 1985).

Acrescido a isso, avalia-se o grau de impacto que dimensionamento de ciclos curtos acarretam ao meio ambiente. Rodovias dimensionadas para uma vida útil de 8 a 12 anos, tendem a impactar significativamente, resultando em maior geração de resíduos, devido aos processos de manutenção e reabilitação que são realizados de forma mais frequente em um curto espaço de tempo, dessa forma, por aumentar o consumo de combustíveis, recursos naturais e combustíveis fósseis a emissão de CO₂ se intensifica grosseiramente. Cabe ressaltar que o dióxido de carbono é um dos principais gases poluentes que contribuem para o efeito estufa e demais variações climáticas no planeta Terra (ECYCLE, 2023).

11.2 Ciclos Longos

Estima-se que, pavimentos dimensionados para suportar longos ciclos de vida útil, com materiais de melhores qualidades, apresentam características distintas e vantagens que superam

pavimentos de ciclos curtos, sejam eles pavimentos rígidos, semirrígidos ou flexíveis. (ANASTASIOU; A. LIAPIS, 2015).

Parte-se do princípio que pavimentos de longo ciclo demandam da utilização de materiais de qualidade superior, desde as camadas mais inferiores até o revestimento. Além disso, misturas asfálticas com ligantes modificados por polímeros ou borracha de pneus, por exemplo, são responsáveis por um aumento na sua ductilidade, aumentando o desempenho do material frente aos principais defeitos das rodovias, que é a deformação permanente e a fadiga (NEGRÃO, 2006).

Também, devido à maior durabilidade, os pavimentos de ciclo longo requerem menos manutenção ao longo da sua vida útil, dado o alto investimento inicial que priorizaram materiais de melhor qualidade e um planejamento de execução adequado. Isso resulta em custos operacionais mais baixos, uma vez que recapeamentos e intervenções frequentes são minimizados, tendo uma redução expressiva nos custos de manutenção, fator que é preponderante para o incremento do método LCC.

O método LCC, não somente se atém a custos, mas se leva em consideração a sustentabilidade e o meio ambiente, por conta disso, é possível interpretar que pavimentos de ciclo longo, independentemente de sua natureza, contribuem com o meio ambiente a longo prazo (LUVIZÃO; TRICHÊS, 2023). Com isso, a demanda de reconstrução leva a menos desperdícios de materiais, menor consumo de recursos naturais e menor impacto ambiental. Alia-se, também, esse quesito ao impacto econômico gerado ao caixa de uma empresa.

Cabe concluir que, pavimentos de ciclo longo geralmente irão envolver custos iniciais mais altos. Isso ocorre devido à necessidade de materiais de alta qualidade, especificações de projeto mais rigorosas e métodos construtivos, por vezes, mais complexos. Luvizão e Trichês (2023), propõe um estudo com diferentes materiais que trazem a comparação e os resultados em pavimentos de ciclos curtos e longos. Embora os custos iniciais sejam superiores, esses custos podem ser compensados pela economia ao longo do ciclo de vida do ativo.

A escolha, portanto, entre pavimentos de ciclos curtos e longos, deve ser orientada pela aplicação do método LCC, que vai permitir avaliar o custo total ao longo da vida útil do pavimento, levando em consideração os custos iniciais e de manutenção, além de uma análise sustentável e benéfica para o meio ambiente.

12 GERAÇÃO DE PASSIVOS

A malha rodoviária brasileira, embora seja vital para o desenvolvimento socioeconômico, apresentam consideráveis desafios ambientais. A construção e operação dessas infraestruturas frequentemente resultam em impactos ambientais significantes que afetam ecossistemas, recursos hídricos, biodiversidade e qualidade do ar e do solo.

Segundo as informações obtidas através do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná – DER/PR (DER/PR, 2000), no contexto empresarial, referindo-se a órgãos públicos e privados, o termo passivo se refere a tudo o que é registrado como débito, como um fator negativo em qualquer empreendimento. Isso compreende o conjunto de compromissos relacionados a questões trabalhistas de seus funcionários, bancárias, fiscais, patrimoniais, entre outros, que não foram cumpridos pela empresa ou empreendimento e que precisam ser contabilizados – retirados – do seu patrimônio/ativo para se obter seu valor real (BLASI, 2014).

É sabido que, para a implementação de rodovias, principalmente para aquelas ainda inexistentes, a conversão de áreas naturais para a construção frequentemente demanda o desmatamento de extensas áreas. Essa ação direta é um dos principais fatores que levam à fragmentação de habitats naturais, ocasionando, principalmente, a perda de biodiversidade. Além disso durante a construção e manutenção de estradas, a remoção da cobertura vegetal expõe o solo à erosão causada pela água das chuvas e pelo tráfego de veículos. Isso gera problemas significantes, como perda de nutrientes do solo e a sedimentação em corpos d'água próximos, impactando a qualidade da água.

Dessa forma, o passivo ambiental resultante das atividades de instalação de obras viárias, refere-se aos compromissos ambientais pendentes de um empreendimento. Isso significa a porção de danos ambientais que não foi devidamente restaurada ou recuperada pelo responsável pelo empreendimento, constituindo-se como uma dívida perante a sociedade e o meio ambiente (DER/PR, 2000).

A existência de passivos ambientais em projetos rodoviários acarreta em consequências que vão além de meros danos financeiros. Esses passivos têm o potencial de gerar impactos diretos, colocando em risco o patrimônio público que, acima de tudo, é o gestor de todo o local onde será implementado novas rodovias, afetando a segurança de usuários e o bem-estar das comunidades vizinhas. Adicionalmente, podem comprometer a funcionalidade e a manutenção das vias já existentes. Por outro lado, essa situação pode representar um perigo de deterioração dos recursos naturais presentes na área de influência das estradas, afetando não apenas o ambiente, mas também o patrimônio privado ao longo da extensão das vias (BLASI, 2014).

Segundo o Diário Oficial da União, na Portaria N° 289 (PORTARIA, 2013), no seu artigo 2º, inciso XII, o passivo ambiental em rodovias é definido como conjunto de mudanças negativas ao meio ambiente resultantes de:

- “Construção, conservação, restauração ou melhoramentos na rodovia, capazes de atuar como fatores de degradação ambiental, na faixa de domínio ou fora desta, bem como de irregular uso e ocupação da faixa de domínio”;
- “Exploração de áreas de “bota-foras”, jazidas ou outras áreas de apoio”; e
- “Manutenção de drenagem com o desenvolvimento de processos erosivos originados na faixa de domínio”.

Além disso, o passivo ambiental presente nas malhas viárias é também composto por defeitos externos originados pela presença da rodovia em áreas de terceiros, assim como pelos impactos causados por esses terceiros, na rodovia. Em muitos casos, esses impactos não podem ser facilmente identificados ou atribuídos a uma única fonte, o que demanda que órgão responsável pela gestão da rodovia assuma esses impactos em prol da rodovia e seus usuários (DNIT, 2006).

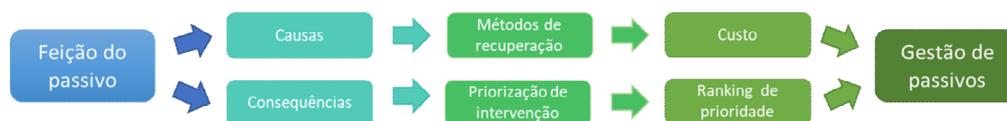
Segundo Blasi (2014), ainda existem outras situações de passivos ambientais sob responsabilidade do responsável pelo empreendimento, mesmo que não tenham sido diretamente ocasionadas por ele, incluem:

- “Presença de depósitos de lixo no interior da faixa, que poderá ser cobrada do empreendedor, mesmo que tenha sido provocada por terceiros”;
- “Acidentes rodoviários devido à falta, a deterioração ou o encobrimento da sinalização pela vegetação”;
- “Áreas degradadas por empréstimo ou destinação de materiais, não provocadas pelo empreendimento”.

Segundo o Pimenta et al. (2014), na situação em que um passivo ambiental é identificado, é fundamental propor medidas corretivas para recuperar os danos, a fim de evitar que o passivo se torne um risco em potencial. Por exemplo, o aumento progressivo desse passivo poderia se estender a outras áreas, gerando novos impactos. Caso não seja viável realizar uma recuperação ou reabilitação completa do passivo ambiental, é essencial buscar alternativas para remediar a situação, aplicando medidas compensatórias ou mitigadoras.

Outrossim, de acordo com Silva, Da Luz e Ratton (2019), o passivo ambiental tem relações entre as feições, suas causas e consequências associadas a gestão de passivos, que é possível verificar na figura 10:

Figura 10 - Interação entre a feição, as causas e as consequências associadas.



Fonte: SILVA; DA LUZ; RATTON, 2019.

Portanto, para minimizar os passivos ambientais em rodovias, medidas sustentáveis e tecnologias inovadoras são cada vez mais necessárias nesse cenário. Isso inclui o uso de materiais reciclados na construção, técnicas de drenagem sustentável para preservar os recursos hídricos, implementação de programas de reflorestamento e restauração de habitats afetados. Ademais, a inclusão de estudos de impacto ambiental no planejamento rodoviário, tal qual o método LCC, desempenha um papel fundamental na busca por soluções que mitiguem os impactos ao meio ambiente. Fica cada vez mais evidente que a utilização de estratégias sustentáveis é essencial para equilibrar o desenvolvimento da infraestrutura viária com a conservação do meio ambiente.

12.1 Integração entre LCC e Geração de Passivos Rodoviários

A integração entre a geração de passivos ambientais em rodovias, estudados anteriormente e a aplicação do método LCC é de suma importância para uma análise mais abrangente de um ativo, além de precisar realizar um levantamento dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dessas infraestruturas rodoviárias. Dessa forma, ingressam diversos aspectos, conforme supracitado em tópicos anteriores, desde um estudo rodoviário, gestão ambiental e economia, considerando a relevância de cada fator.

Pode-se interpretar, fundamentado nisso, que as rodovias geralmente formam passivos ambientais durante todas as fases de seu ciclo de vida. Desde a fase primária, que é o planejamento executivo, onde ocorre o desmatamento e alteração do ambiente natural que será executada a rodovia, até as etapas posteriores, como a de operação, que gera poluições pertinentes ao ar atmosférico, além de poluições sonoras e problemas de erosão do solo, incluindo a fase de possíveis reabilitações ou desativação, que podem envolver, até mesmo, a remoção da via.

Além disso, foi possível observar que a metodologia do LCC analisa e quantifica os custos financeiros totais de um projeto ao longo do seu tempo, desde os custos iniciais até os

operacionais, salientando a sustentabilidade em todas as fases, conforme supracitado em itens anteriores. Por isso, com um olhar sustentável, agrega-se ao LCC a quantificação da geração de passivos ambientais. Incluindo a degradação do ambiente natural, os gastos com medidas de mitigação, recuperação de áreas degradadas e os impactos na biodiversidade.

Outrossim, a análise conjunta e integrada entre os passivos ambientais e do LCC, oferece vantagens significativas, permitindo a identificação de estratégias de projeto e construção que minimizam impactos ambientais que reduzam custos futuros, demonstrando as possibilidades que permitam elencar a prioridade de um determinado projeto, baseado em caráter econômico e sustentável, respeitando todas as premissas necessárias.

Aliar os cuidados necessários com a geração de passivos e o método trabalhado, não garante somente bons hábitos para o fluxo de caixa de uma empresa, mas permite que o órgão ou a concessionária tenham um olhar mais voltado para a sustentabilidade, onde os mesmos, possam priorizar não exclusivamente seus custos, mas sim, o que deixarão de herança para o meio ambiente, avaliando bons lugares de implantação, materiais de melhor qualidade que irão garantir rodovias mais resistentes e sustentáveis, sem necessidade de manutenção frequente. Fatores como os citados, somado a outros mencionados ao longo desse trabalho, garantem uma análise robusta e completa entre custos e impactos ambientais que as rodovias geram, auxiliando em tomadas de decisões informadas e fundamentadas em conceitos importantes que garantam que os ativos irão suprir com as necessidades para um ciclo de vida.

13 MODELOS PARA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA LCC

Compreender a teoria do método LCC é de suma importância para que seja possível aplicar a fundamentação teórica aos cálculos que trarão os custos ao longo do ciclo de vida de um ativo, onde se torna mais materializado a comprovação de que um planejamento economicamente eficiente e sustentável, é de extrema relevância para um órgão público ou uma empresa privada.

Autor grandemente renomado quando se trata da metodologia do LCC e base para desenvolvimento deste tópico, Dhillon (2010) destaca a importância de considerar diferentes custos envolvidos no ciclo de vida de um ativo, como custos de máquinas e operação que serão utilizados. Dhillon (2010) considera, em um primeiro momento, a consideração do LCC aplicado ao conceito de cálculo do custo do ciclo de vida na seleção de equipamentos de diferentes fabricantes, avaliando qual dos maquinários seria mais benéfico na aplicação do método. Dentro desse parâmetro, o autor utiliza fatores matemáticos como o custo esperado de avaria de determinado equipamento de forma anual, o valor no momento atual de implementação do custo de avaria do ciclo de vida dos equipamentos dos diferentes fabricantes, além da taxa de juros anual, considerada por determinado órgão estatal. O autor, por fim, chega a seguinte equação quando se há a necessidade de comparação para diferentes maquinários:

$$LCC = PC + PV_{df} + PV_{do} \quad (4)$$

Onde:

- LCC: custo do ciclo de vida de determinado equipamento;
- PC: custo de aquisição do equipamento;
- PV_{df} : valor atual do custo de falha do ciclo de vida do equipamento;
- PV_{do} : valor atual do custo de funcionamento do ciclo de vida do equipamento.

Dhillon (2010) afirma que, surgiu diversos modelos de avaliação de custos do ciclo de vida de um ativo. Os modelos abrangem tanto aspectos genéricos quanto mais específicos, porém, o autor afirma que nenhum modelo foi amplamente difundido na indústria.

Segundo o autor, existem várias razões para a ausência de um modelo padrão e pré-determinado. Isso pode ser atribuído às preferências individuais dos usuários que irão utilizar a metodologia, também, outros fatores como à complexidade dos problemas enfrentados, à

diversidade de sistemas de coleta de dados sobre custos e à variedade de equipamentos, dispositivos e sistemas disponíveis.

A estimativa de custos desempenha um papel fundamental, pois a precisão é essencial para evitar consequências adversas decorrentes de estimativas incorretas. Atualmente, há uma gama de métodos empregados de estimativa de diferentes tipos de custos, cada um com suas vantagens e desvantagens. Um método pode se mostrar altamente eficaz em uma aplicação específica, mas menos eficiente em outra. Isso ressalta a importância de selecionar com cautela o método de estimativa de custos adequado para cada aplicação específica (Dhillon, 2010).

Dhillon (2010), traz três métodos, com diferentes modelos sendo eles os modelos gerais de custos do ciclo de vida, modelos específicos de custos do ciclo de vida e o método de estimativa de custos, que são passíveis de aplicação em diversas áreas da engenharia, inclusive, rodovias. Os métodos descritos pelo autor serão descritos ao longo dos tópicos seguintes:

13.1 Modelos Gerais de Custos do Ciclo de Vida

Esses modelos não estão associados a nenhum sistema ou equipamento específico, tendo possibilidade de aplicação ampla. Segundo Dhillon (2010), são eles:

13.1.1 Modelo I:

Nessa situação específica, os custos ao longo da vida útil do equipamento ou sistema podem ser categorizados em duas partes fundamentais: custos recorrentes e custos não recorrentes.

$$LCC = RC + NRC \quad (5)$$

Onde:

- LCC: custo do ciclo de vida de um item ou sistema;
- RC: custo recorrente;
- NRC: custo não recorrente.

O custo recorrente (RC), é expresso por:

$$RC = OC + IC + SC + MC + MTC \quad (6)$$

Onde:

- OC: custo de operação;
- IC: custo de inventário;
- SC: custo de suporte;
- MC: custo de mão de obra;
- MTC: custo de manutenção.

O custo não recorrente (NCR), é expresso por:

$$NRC = C_p + C_i + C_q + C_r + C_t + C_{rm} + C_s \quad (7)$$

Onde:

- C_p : custo de aquisição;
- C_i : custo de instalação;
- C_q : custo da qualificação;
- C_r : custo de pesquisas e desenvolvimento;
- C_t : custo de treinamento;
- C_{rm} : custo de reabilitação e manutenção;
- C_s : custo de suporte.

13.1.2 Modelo II:

Nessa situação específica, os gastos ao longo da vida útil do equipamento ou sistema podem ser subdividido em três partes principais: o custo inicial de compra (aquisição), os custos logísticos iniciais e os custos recorrentes.

$$LCC = C_1 + C_2 + C_3 \quad (8)$$

Onde:

- LCC: custo do ciclo de vida de um item ou sistema;
- C_1 : custo inicial de aquisição;
- C_2 : custos logísticos iniciais;
- C_3 : custos recorrentes.

O custo logístico inicial, representado por C_2 , engloba despesas específicas, como a compra de novo equipamento de suporte que não foi considerado no ciclo de vida inicial, os investimentos em treinamentos, os custos relacionados a modificações no equipamento de suporte já existente e os gastos associados à gestão dos dados técnicos iniciais.

Os três elementos primordiais que compõe os gastos periódicos, representados por C_3 , englobam o custo operacional, as despesas de gerenciamento e os custos associados à manutenção.

13.1.3 Modelo III:

A Marinha dos Estados Unidos concebeu este modelo visando a estimativa dos gastos ao longo do ciclo de vida dos principais sistemas de armas. A avaliação dos custos durante o ciclo de vida do sistema é subdividida em cinco componentes primordiais: custos de pesquisa e desenvolvimento, custos correlacionados aos sistemas, investimentos, encerramento e custos de operação e suporte.

$$LCC = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (9)$$

Onde:

- LCC: custo do ciclo de vida de um item ou sistema;
- C_1 : custos de pesquisa e desenvolvimento;
- C_2 : custos correlacionados aos sistemas;
- C_3 : custos relacionados a investimentos;
- C_4 : custos relacionados a encerramentos;
- C_5 : custos relacionados a operação e suporte.

Os custos associados à pesquisa e desenvolvimento, representados por C_1 , têm como principais componentes o custo de desenvolvimento em escala real e o custo de validação. Da mesma forma, os elementos fundamentais dos custos vinculados aos sistemas, C_2 , incluem seus gastos iniciais e os custos contínuos de operação e suporte.

Em relação ao investimento, representado por C_1 , é composto por dois elementos centrais: o investimento público e os custos de aquisição. Dessa forma, os custos de encerramento, C_4 , são representados por:

$$C_4 = \sum_{i=1}^m x_i c_t \quad (10)$$

Onde:

- m : número total de anos do ciclo de vida estimado;
- x_i : número total de elementos principais do sistema colocados de fora do serviço durante o ano i ;
- c_t : custo terminal do elemento principal do sistema.

Por fim, os fatores relacionados aos gastos de operação e suporte abrangem o custo de suprimento do depósito, o custo de abastecimento do depósito, custos de manutenção do depósito, custos operacionais, despesas com material humano, investimento de apoio, despesas de suporte, custos de transporte e atividades de manutenção organizacional e intermediária.

13.1.4 Modelo IV:

Nesse caso, o modelo para o ciclo de vida é expresso por:

$$LCC = C_{cp} + C_{dp} + C_{pp} + C_{op} \quad (11)$$

Onde:

- LCC : custo do ciclo de vida;
- C_{cp} : custo associado à fase conceitual;
- C_{dp} : custo associado à fase de definição;
- C_{pp} : custo associado à fase de aquisição;
- C_{op} : custo associado à fase operacional.

Os gastos durante as etapas de concepção e definição tendem a ser consideravelmente menores se comparados aos gastos envolvidos nas etapas de aquisição e operação. Geralmente, esses custos estão fortemente associados ao esforço de trabalho humano.

Os principais elementos que compõem os custos na fase de aquisição incluem o custo do equipamento ou sistema principal, os gastos relacionados à equipe de aquisição, os custos do próprio processo de aquisição, como licenças e escrituras, os custos de equipamentos de suporte e os custos de gerenciamento. São representados por:

$$C_{op} = C_m + C_{fo} + C_{oa} \quad (12)$$

Onde:

- C_m : custos de manutenção;
- C_{fo} : custos de funcionamento;
- C_{oa} : custo administrativo operacional.

13.1.5 Modelo V:

Nesse caso, o modelo é expresso por:

$$LCC = C_{rd} + C_{pc} + C_{os} + C_{rt} \quad (13)$$

Onde:

- LCC: custo do ciclo de vida;
- C_{rd} : custo associado à pesquisa e desenvolvimento;
- C_{pc} : custo de produção e construção;
- C_{os} : custo de operação e apoio;
- C_{rt} : custo de reforma e eliminação.

O custo associado à pesquisa e desenvolvimento, C_{rd} , é expresso por:

$$C_{rd} = \sum_{j=1}^7 C_{rdj} \quad (14)$$

Onde C_{rd} , é o J-ésimo elemento de custo de pesquisa e desenvolvimento, para:

- $J = 1$, significa planejamento do produto;
- $J = 2$, design de engenharia;
- $J = 3$, significa gestão do ciclo de vida do produto ou do sistema;
- $J = 4$, significa ensaio e avaliação do sistema ou do produto;
- $J = 5$, significa investigação de produtos ou sistemas;
- $J = 6$, designa o *software* do produto ou do sistema; e
- $J = 7$, designa a documentação do projeto.

Os custos de produção e construção, C_{pc} , são definidos por:

$$C_{pc} = \sum_{j=1}^5 C_{pcj} \quad (15)$$

Onde C_{pcj} , é o J-ésimo elemento de custo de produção e construção, para:

- J = 1, significa fabricação;
- J = 2, significa construção;
- J = 3, significa controle de qualidade;
- J = 4, significa apoio de logística inicial;
- J = 5, significa indústria e análise de operações;

Os custos de operação e apoio, C_{os} , são definidos por:

$$C_{os} = \sum_{j=1}^3 C_{osj} \quad (16)$$

Onde C_{osj} , é o J-ésimo elemento de custo de operação e apoio, para:

- J = 1, significa operações do sistema ou do produto;
- J = 2, significa distribuição do produto ou do sistema;
- J = 3, significa apoio logístico de manutenção.

Os custos de reforma e eliminação, C_{rt} , são definidos por:

$$C_{rt} = C_{ur} + [\theta K (C_{id} - \gamma_v)] \quad (17)$$

Onde:

- C_{ur} : custo final de retirada do sistema ou produto;
- θ : fator de condenação;
- K: número total de ações de manutenção não programadas;
- C_{id} : custo de eliminação do item;
- γ_v : valor de recuperação.

13.1.6 Modelo VI:

Esse modelo foi concebido pelo Comando de Material do Exército dos Estados Unidos e compreende três elementos fundamentais: o custo de investimento, os gastos relacionados à pesquisa e desenvolvimento, e os custos de operação e suporte. Dessa maneira, os custos ao longo do ciclo de vida são representados matematicamente por:

$$LCC = C_1 + C_2 + C_3 \quad (18)$$

Onde:

- LCC: custo do ciclo de vida;
- C_1 : custo de pesquisa e desenvolvimento;
- C_2 : custo de investimento;
- C_3 : custo de funcionamento e apoio.

O custo de pesquisa e desenvolvimento, C_1 , é composto pelos seguintes componentes:

- Custo dos dados de pesquisa e desenvolvimento;
- Custo das ferramentas de pesquisa e desenvolvimento;
- Custo das instalações de pesquisa e desenvolvimento;
- Custo da engenharia de desenvolvimento;
- Custo de fabricação de protótipos;
- Custo de testes e avaliações de pesquisa e desenvolvimento;
- Custo de engenharia e planejamento da capacidade de produção;
- Custo do sistema de pesquisa e desenvolvimento ou da gestão de projetos;
- Custos dos serviços de formação e equipamentos de pesquisa e desenvolvimento; e
- Outros custos de investigação e desenvolvimento.

O custo de investimentos, C_2 , é composto pelos seguintes componentes:

- Custo de produção;
- Custo de treinamento inicial;
- Custo de transporte;
- Custo dos dados;
- Custo das alterações de engenharia;
- Custo de investimento não recorrente;
- Custo dos ensaios e da avaliação do sistema;
- Custo de gestão do sistema ou do projeto na fase de produção;

- Custo das peças sobressalentes e de reparação iniciais;
- Custo operacional ou de ativação do local; e
- Outros custos de investimento.

Por fim, o custo de suporte e operação, C_3 , é composto pelos seguintes componentes:

- Custo das operações de apoio indireto;
- Custo da manutenção do depósito;
- Custo das modificações de materiais;
- Custo de consumo;
- Custo do pessoal militar; e
- Custo de outras operações de apoio direto.

13.2 Modelos Específicos de Custos do Ciclo de Vida

Com o passar do tempo, uma variedade de modelos matemáticos foi criada visando estimar os gastos durante a vida útil de sistemas ou produtos específicos. Segundo Dhillon (2010), alguns modelos são:

13.2.1 Modelo I:

Esse modelo foi desenvolvido com a finalidade de calcular os gastos ao longo da vida útil das fontes de fornecimento de abastecimento, é expresso por:

$$LCC_s = IC + FC \quad (19)$$

Onde:

- LCC_s : custos de fontes de fornecimento de abastecimento;
- IC: custo inicial; e
- FC: custo de falha.

O custo de falha, é demonstrado por:

$$FC = \lambda(n)(C_r + C_s) \quad (20)$$

Onde:

- λ : constante para taxa de falha do produto/unidade;
- n : vida útil prevista do produto/unidade;
- C_r : custo de reparação; e
- C_s : custo de peças reservas.

O custo de reparos, C_r , é expresso por:

$$C_s = C_u(K) \quad (21)$$

Onde:

- C_u : custos de reparo do produto/unidade; e
- K : número fracionado de peças reservas para cada unidade ativa.

13.2.2 Modelo II:

Esse modelo foi desenvolvido com o propósito de calcular os gastos totais ao longo da vida das estruturas destinadas a cuidados de saúde. Esse custo, é feito através da seguinte equação:

$$LCC_h = C_c + C_o \quad (22)$$

Onde:

- LCC_h : custo do ciclo de vida das instalações de cuidados à saúde;
- C_c : custo de capital; e
- C_o : custo de funcionamento.

O custo de capital, C_o , é composto pelos oito elementos de custo seguintes:

- Custo de aquisição do terreno;
- Custo de financiamento;
- Custo do equipamento de garantia;
- Custo direto de construção ou aquisição;
- Custo indireto;
- Custo de demolição e preparação do local;
- Custo de alteração e substituição; e

- Custo de não utilização.

Seguindo a mesma linha, o custo de funcionamento, C_o , é composto pelos seguintes elementos:

- Custo dos serviços públicos e do combustível;
- Custo de manutenção estrutural;
- Custo de operação e manutenção do sistema de aquecimento;
- Custo de pintura;
- Custo de manutenção do equipamento (mobiliário);
- Custo de limpeza no exterior do edifício;
- Custo de operação e manutenção do sistema elétrico;
- Custo das alterações de espaço;
- Custo de restauração exterior;
- Custo de manutenção de terrenos e estradas;
- Manutenção de equipamento (equipamento fixo e construção específica);
- Custo de controle de insetos e roedores (dedetização);
- Custo da incineradora e do recolhimento do lixo;
- Custo de limpeza interna dos edifícios;
- Custo de operação e manutenção de sistemas mecânicos especiais;
- Custo de operação de elevadores, escadas rolantes e elevador de carga;
- Custo de operação e manutenção de canalizações e sistemas de esgotos;
- Custo de manutenção dos sistemas de proteção contra incêndios; e
- Custo de operação e manutenção dos sistemas de ar condicionado e ventilação.

13.2.3 Modelo III:

Esse modelo foi concebido para calcular os custos ao longo da vida de um sistema de radar de alerta. Esse custo, é definido por:

$$LCC_r = C_p + C_o + C_s \quad (23)$$

Onde:

- LCC_r : custo do ciclo de vida do radar de alerta;
- C_p : custo de aquisição do radar;

- C_o : custo de funcionamento do radar; e
- C_s : custo de apoio logístico do radar.

Custo de aquisição do radar, C_p , é dado por:

$$C_p = FC + ICC + DC + DOC \quad (24)$$

Onde:

- FC : custo de fabricação;
- ICC : custo de instalação e controle;
- DC : custo de projeto; e
- DOC : custo de documentos legais.

Custo de operação do radar, C_o , é definido por:

$$C_o = C_1 + C_2 + C_3 \quad (25)$$

Onde:

- C_1 : custo do combustível;
- C_2 : custo do material humano; e
- C_3 : custo da eletricidade.

Custo da logística de suporte para funcionamento do radar, C_s , é dado por:

$$C_s = CRL + CRM + CIS + CRS + CIT + AC \quad (26)$$

Onde:

- CRL : custo da mão de obra de reparação;
- CRM : custo do material de reparação;
- CIS : custo das peças reservas iniciais;
- CRS : custo das peças reservas de substituição;
- CIT : custo de formação inicial; e
- AC : custo da idade.

13.2.4 Modelo IV:

Esse modelo foi desenvolvido com o intuito de calcular os custos ao longo da vida útil dos sistemas utilizados. É calculado por:

$$LCC_{is} = RDTC + PC + OMC \quad (27)$$

Onde:

- LCC_{is} : custo do ciclo de vida dos sistemas;
- $RDTC$: custo de pesquisa, desenvolvimento, ensaio e avaliação;
- PC : custo de aquisição; e
- OMC : custo de operação e manutenção.

Custos de pesquisa, desenvolvimento, ensaio e avaliação, $RDTC$, é composto pelos seguintes elementos:

- Custo do software;
- Custo dos ensaios;
- Custo de gestão do programa;
- Custo de estudos conceituais;
- Custo de propostas de alteração de engenharia;
- Custo da engenharia de projeto;
- Custo dos dados técnicos; e
- Custo de formação.

Os componentes que abrangem o custo de aquisição, PC , são:

- Custo de novas instalações;
- Custo das peças reservas;
- Custo de aquisição de equipamento de apoio;
- Custo de aquisição recorrente do sistema;
- Custo dos dados técnicos;
- Custo do curso de formação inicial;
- Custo do equipamento de formação;
- Custo das ferramentas de produção e do equipamento de ensaio;
- Custo de iniciação do programa de produção;

- Custo da gestão inicial do item;
- Custo de engenharia no terreno; e
- Custo de instalação do equipamento.

Custos de operação e manutenção, OMC , é expresso por:

$$OMC = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 OMC_{ji} \quad (28)$$

Onde:

- n : número total de anos;
- OMC_{ji} : custo de operação e manutenção ao nível j de manutenção no i -ésimo ano.

13.2.5 Modelo V:

Este modelo tem por objetivo estimar o custo do ciclo de vida do software. Por vezes, o modelo é designado por “modelo Boeing C-14”, segundo Dhillon (2010). O custo do ciclo de vida software é expresso por:

$$LCC_s = AC_s + SC_s \quad (29)$$

Onde:

- LCC_s : custo do ciclo de vida do software;
- AC_s : custo de aquisição do software; e
- SC_s : custo de suporte e manutenção do software.

O custo de suporte do software, SC_s , é definido por:

$$SC_s = \left[(2.5)(LC) \sum SMM_j \right] (1 + \alpha) + SC_a \quad (30)$$

Onde:

- LC : custo da mão de obra direta por homem/mês;
- $\sum SMM_j$: somatório de homem/mês necessário para o suporte no mês j ;
- α : fator de despesas gerais; e
- SC_a : são os custos adicionais de suporte.

13.3 Método de Estimativa de Custos

Com o passar do tempo, houve o desenvolvimento de diversos métodos para avaliação de custos. A seguir, segundo Dhillon (2010), são destacados alguns dos métodos considerados úteis para serem aplicados no conceito do LCC, os métodos são:

13.3.1 Modelo I:

Esse método é reconhecido por ser altamente eficaz na obtenção rápida de estimativas aproximadas de custo para novas instalações, projeto ou equipamentos similares, porém, com diferentes capacidades. A relação entre custo e capacidade é estabelecida por:

$$C_n = C_o \left[\frac{K_n}{K_o} \right]^\alpha \quad (31)$$

Onde:

- C_n : custo da nova instalação, projeto ou equipamento em consideração;
- C_o : custo do equipamento, instalação ou projeto antigo, mas semelhante;
- K_n : capacidade da nova fábrica, projeto ou equipamento;
- K_o : capacidade do equipamento, instalação ou projeto antigo, mas semelhante;
- α : fator custo/capacidade, cujo valor frequentemente utilizado, segundo Dhillon (2010), é igual a 0,6. Esses valores são propostos para este fator e, para itens como trocadores de calor, aquecedores, bombas e tanques são 0,6, 0,8, 0,6 e 0,7, respectivamente.

13.3.2 Modelo II:

Segundo Dhillon (2010), esse método é denominado como Método do Fator Lang. Ele é empregado para realizar estimativas rápidas de custos aproximados, baseando-se em fatores de custo médio histórico. Lang propôs calcular os custos totais da instalação a partir do custo do equipamento fornecido, utilizando três fatores como multiplicadores: $n = 3,10$ (para instalações de processo sólido), $n = 3,63$ (para instalações sólidos-fluido) e $n = 4,74$ (para instalações de processo fluido). Dessa forma, a estimativa total de custo da instalação é derivada, utilizando:

$$TPC = (n)(DEC) \quad (32)$$

Onde:

- *TPC*: estimativa total do custo da instalação;
- *n*: fator Lang, cujo valor depende da natureza da instalação; e
- *DEC*: custo do equipamento fornecido.

13.3.3 Modelo III:

Esse método representa, essencialmente, uma evolução do método do fator Lang e é reconhecido como o Método de Hand. Nesse refinamento, sugere-se a aplicação de diferentes fatores para diferentes conjuntos de equipamentos. O custo total instalado para cada grupo de equipamentos é estabelecido por:

$$IC_t = (m)(DEC) \quad (33)$$

Onde:

- IC_t : custo total instalado de cada grupo de equipamento;
- *m*: fator Hand, que abrange os materiais de campo (estruturas, isolamento, tubulações, acabamento e fundações), mão de obra e custos indiretos. Os valores do fator Hand para vários grupos de equipamento são 2 (aquecedores), 2,5 (compressores), 2,5 (equipamentos diversos), 3,5 (trocadores de calor), 4 (bombas), 4 (vasos de pressão), 4 (instrumentos) e 4 (torres de fracionamento); e
- *DEC*: custo do equipamento fornecido.

Nota-se que, esses fatores de mão de obra incorporam uma previsão para possíveis imprevistos que possam vir a ocorrer.

13.3.4 Modelo IV:

Esse método é bastante eficaz para realizar uma estimativa aproximada das necessidades de mão de obra operacional quando não há disponibilidade de uma tabela de Manning. Conhecido como método de Wessel, a equação é expressa por:

$$\frac{OH}{\lambda} = \alpha \left[\frac{K}{(P)^{0,76}} \right] \quad (34)$$

Onde:

- OH : número de horas/homem de funcionamento;
- λ : toneladas de produto;
- K : número total de etapas do processo; e
- P : capacidade expressa em toneladas por dia.

Os valores de α são: 23 (para uma operação descontínua com mão de obra máxima), 10 (para um processo bem instrumentado) e 17 (para uma operação com necessidades médias de mão de obra).

13.3.5 Modelo V:

Esse método é identificado como o método do índice de rotação e é tido como a abordagem mais eficaz para estimar os custos das instalações. Contudo, é considerado, provavelmente, o método que menos entrega precisão em seus resultados. O índice de rotação é definido por:

$$TOR = \frac{AS}{I} \quad (35)$$

Onde:

- TOR : índice de volume de negócios;
- AS : vendas brutas anuais; e
- I : investimento em capital fixo.

As vendas anuais brutas, AS , são expressas por:

$$AS = (SP)(PR) \quad (36)$$

Onde:

- SP : preço de venda unitário; e
- PR : taxa de produção anual.

Nota-se que o valor do índice de rotação, TOR , varia normalmente entre 0,2 a 8.

14 SISTEMAS PARA APOIO DA METODOLOGIA LIFE CYCLE COSTING

No contexto da aplicação dessa metodologia, a utilização de sistemas automatizados tornou-se uma necessidade premente para otimizar e agilizar o processo de avaliação de custos ao longo do ciclo de vida de uma rodovia. Este tópico focaliza a descrição de dois softwares amplamente empregados na área, o "openLCA" e o "HDM-4", destacando suas funcionalidades e contribuições para a análise de custos ao longo do ciclo de vida das rodovias.

Além disso, é pertinente mencionar que o panorama dos *softwares* destinados à aplicação da metodologia *Life Cycle Costing* é diversificado, abrangendo diferentes abordagens e funcionalidades. Segundo a autora Curran (2006) e o *website Building Ecology* (s.d.), existem outros *softwares* reconhecidos e amplamente utilizados, embora igualmente relevantes, serão citados a fim de possibilitar o conhecimento sobre a existência dessas ferramentas. Essa escolha estratégica visa proporcionar uma compreensão mais abrangente e aprofundada dos aspectos fundamentais dos sistemas mais utilizados na aplicação da metodologia *Life Cycle Costing*.

14.1 Software openLCA – *Open Soucer Life Cycle Assesment*

O *software* openLCA é um *software* de código aberto destinado à realização de Avaliação de Ciclo de Vida e avaliações relacionadas à sustentabilidade, criado pela GreenDelta em 2006. Por ser um *software* de código aberto, está disponível gratuitamente, sem necessidade de qualquer tipo de licenciamento, mensal ou anual. Segundo OPENLCA (s. d.) ressalta que seu código-fonte é acessível e, segundo a criadora, pode ser visualizado e adaptado por qualquer indivíduo de acordo com sua necessidade e demanda. Além disso, a natureza do *software* de código aberto o torna adequado para lidar com informações sensíveis. Tanto o openLCA quanto os modelos desenvolvidos pode ser compartilhado livremente, desde que a licença do banco de dados permita.

“Acreditamos então que o openLCA, com meios flexíveis e poderosos de modelar ciclos de vida, com a habilidade de calcular indicadores ambientais, sociais, e econômicos, com *plugins* que provêm diferentes elementos específicos, e com sua arquitetura aberta que facilmente importa e exporta os dados e a integração com outras áreas do TI, é o *software* mais indicado para modelar o ciclo de vida de objetos.” (CIRTH, SROCKA e HILDENDRANG, s.d.)

A concepção para o desenvolvimento do projeto e do *software* em questão, teve origem no ano de 2006, através de projetos dos criadores Andres Cirth, Michael Srocka e Jutta Hildendrang. O propósito inicial era criar um software gratuito voltado para a avaliação do ciclo de vida de determinados ativos, tendo abordagens correlatadas, visando abrir novas possibilidades em diversos campos, como ciência, educação, treinamento, revisões e engenharia. Além disso, a divulgação do código fonte possibilita análises mais aprofundadas sobre os métodos de cálculo utilizados. Segundo os criadores, isso requer um alto padrão de qualidade na programação, pois permite que qualquer usuário possa implementar módulos adicionais necessários ou fazer modificações no código fonte conforme necessário, sendo passível de aplicação em diversas áreas distintas com alta eficácia.

É válido ressaltar que, segundo o manual do software, contido na sua plataforma a base de dados do openLCA contém os seguintes elementos que são considerados importantes para a aplicação da metodologia LCC:

- “Autores: usuários que forneceram ou editaram uma base de dados”;
- “Moeda: custos podem ser anexados aos "fluxos" e o custo de ciclo de vida pode ser performado e alterado conforme necessidade do usuário”;
- “Localizações: importante para regionalizar conforme taxas estaduais e demais informações que são baseadas em localizações”;
- “Fontes: referências bibliográficas disponíveis em artigos e internet”;
- “Grupos unitários: grupos de unidades (por exemplo: unidade de área m², etc.)”;
- “Propriedades de fluxos: comprimento, massa, volume, etc.”;
- “Fluxos: produtos e materiais, conforme necessidade de aplicação do usuário”;
- “Processos: produção ou modificação de produtos e materiais”;
- “Métodos de avaliação: metodologia de avaliação de impacto importada no openLCA”;
- “Sistemas de produto: redes de processo (necessárias para calcular os resultados e análise de impacto econômico e sustentável)”;
- “Projetos: podem ser criados para comparar variáveis de sistemas de produtos”;
- “Indicadores e parâmetros: indicadores sociais, parâmetros globais, sistemas de qualidade de dados”.

14.2 Software HDM-4 – Highway Development and Management Model

Segundo uma apresentação realizada por Arango (s.d) para Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), sobre a calibração e aferição do modelo HDM-4 para as condições da rede de rodovias do Brasil, o software HDM-4 representa uma ferramenta elaborada para auxiliar na tomada de decisões, especialmente no âmbito da gestão voltada para a conservação e reabilitação de pavimento em sistemas viários. O programa em questão, foi concebido com o intuito de realizar análises econômicas da malha viária diante de limitações orçamentárias, com o objetivo de abranger a maior extensão possível da rede rodoviária. Sua finalidade é buscar o maior retorno econômico através do Valor Presente Líquido, considerando diversos cenários ao longo de um horizonte de projeto, como por exemplo, os ciclos longos ou curtos, supracitados no presente trabalho. Esse programa, permite a análise de múltiplas alternativas de intervenção em cada trecho da rede, indicando o momento mais apropriado para a realização de investimentos, almejando, ao final do período de análise, aprimorar as condições da rede viária.

Os elementos essenciais para a entrada de dados do HDM-4 são as condições atuais dos pavimentos das estradas, obtidas no Banco de Dados para cada segmento (incluindo extensões, estrutura, volume de tráfego, defeitos, irregularidades, medições de deflexão, características geométricas como largura de pista e acostamento, declividades médias, índice de curvatura, entre outros – juntamente com as condições climáticas, topográficas, idade do pavimento, data da última restauração, entre outras entradas de dado). Além disso, são utilizados dados da frota nacional, abrangendo informações sobre tipos de veículos, pesos, custos de aquisição e manutenção e, também, custo de combustível, juntamente com as políticas de intervenção, definindo o tipo de manutenção ou restauração e seus custos, além dos cenários de investimento (GOVERNO FEDERAL, s.d.).

O embasamento analítico do HDM-4 se fundamentou na ideia do ciclo de vida das rodovias, geralmente abrangendo um período de 15 a 40 anos. Essa abordagem é essencial para prever como uma rodovia se comporta diante da deterioração da superfície, das intervenções realizadas, do impacto nos usuários e dos efeitos ambientais e socioeconômicos. Para realizar essa previsão, o programa considera uma série de elementos, incluindo a carga imposta pelo tráfego, as condições meteorológicas e os efeitos decorrentes de sistemas de drenagem deficientes (NUNES, 2012).

Ainda segundo Nunes (2012), a velocidade de deterioração do asfalto é diretamente influenciada pelas estratégias de manutenção adotadas para corrigir problemas na superfície da

estrada, como fissuras, buracos e outras imperfeições, ou para conservar a estrutura fundamental do pavimento, assegurando que a via suporte o tráfego previsto em seu projeto. A perspectiva de longo prazo em relação ao estado de uma rodovia, portanto, está intimamente ligada às intervenções realizadas. É importante destacar que a precisão das previsões sobre a performance do pavimento está vinculada à precisão com que os modelos do programa HDM-4 são ajustados para se adequarem às condições específicas do local.

Os resultados gerados pelo HDM-4 apresentam-se na forma de intervenções, recomendadas para cada trecho, junto com os custos estimados e o momento ideal para execução, considerando diferentes cenários de investimento. É importante ressaltar que o uso desse programa é mandatório para a obtenção de financiamento e investimentos por parte do Banco Mundial (GOVERNO FEDERAL, s.d.). Outrossim, Arango (s.d.), afirma que os modelos gerados pelo software HDM-4 são confiáveis para aplicação, pois os resultados são suportados e controlados estatisticamente, além de ter modelos que se mostraram eficazes na previsão da degradação das estradas no Brasil. Também, as modificações feitas nos modelos por meio do ajuste dos coeficientes refletem as tendências de deterioração das rodovias em nível regional no país.

14.3 Demais sistemas automatizados

Conforme citado anteriormente, existem alguns outros *softwares* automatizados que auxiliam na escolha de projetos mais sustentáveis e econômicos, portanto, devem ser mencionados, são eles:

- *BEES – Building Enironmetal and Economic Sustainability;*
- *BLCC – Building Life-Cycle Cost;*
- *Boustead Model;*
- *CMLCA 6.1;*
- *DuboCalc;*
- *Ecoinvent;*
- *ECO-it 1.3;*
- *Environmental Impact Indicator;*
- *EPS 2000 Design System;*
- *GaBi 4 Software and DataBases;*
- *GEMIS – Global Emission Model for Integrated Systems;*

- *Greet Model*;
- *KCL-ECO 4.0*;
- *LCAPIX*;
- *MIET 3.0 – Missing Inventory Estimation Tool*;
- *REGIS*;
- *SimaPRO*;
- *SPINE@CPM*;
- *SPOLD Data Exchange Software*; e
- *Umberto – Life Cycle Assessment Software*.

15 GERAÇÃO DE CARBONO E A METODOLOGIA LCC

No ano de 2013, o setor de transporte rodoviário contribuiu com 23% das emissões totais de dióxido de carbono (CO₂) nos 28 países que compõem a União Europeia (ARAÚJO, 2016). Por conta disso, sendo implementadas diversas iniciativas para reduzir as emissões de CO₂ provenientes dos veículos, tanto no Brasil quanto no mundo. Essas medidas se concentram principalmente no estabelecimento de metas para melhorar a eficiência energética, na promoção de combustíveis mais ecológicos e sustentáveis, como os biocombustíveis e, além disso, associar a integração de novas tecnologias, como os veículos elétricos e híbridos (ESPÍNDOLA, 2020). Somado a isso, acordos a nível mundial estão sendo afirmados entre os países, com o intuito de reduzir a emissão de poluentes em prol da diminuição dos impactos ambientais.

Ainda segundo Espíndola (2020), durante a 21^a Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), em 2015, foi concretizado um passo significativo e de grande relevância no Acordo de Paris, o mais recente pacto global sobre questões climáticas. Este acordo foi estabelecido com a meta de intensificar os esforços a nível mundial para enfrentar a ameaça representada pela mudança climática, além de fortalecer a capacidade dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas transformações.

Os 195 países participantes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC) ratificaram o Acordo de Paris, estabelecendo o compromisso de diminuir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) a fim de conter o aumento da temperatura média global para até 2°C acima dos níveis pré-industriais, buscando ainda limitar esse aumento para até 1,5°C até o ano de 2100. Por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (CND), cada governo apresentou seus compromissos individuais de redução das emissões de GEE (MMA, 2015).

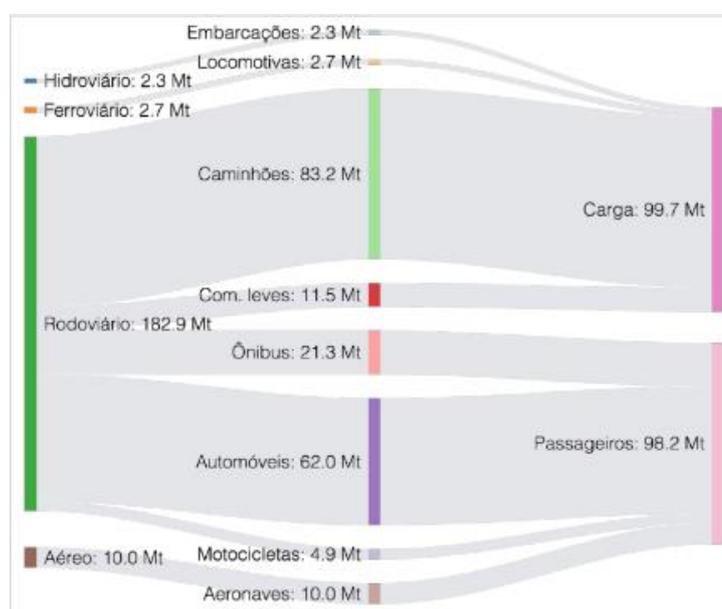
Em setembro de 2016, mediante aprovação do Congresso Nacional, o Brasil aderiu formalmente ao Acordo de Paris, convertendo suas metas em compromissos concretos. Com essa mudança, entrou em vigor a NDC do Brasil (Contribuição Nacionalmente Determinada) (MMA, 2016).

Ainda segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2016), o compromisso estabelecido pelo Brasil em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) visa a uma redução de 37% das emissões de gases de efeito estufa em relação aos níveis de 2005 até 2025. Além disso, o país expressou uma contribuição indicativa subsequente, visando reduzir essas

emissões em 43% até 2030, tomando medidas como o aumento esperado para cerca de 18% da participação de bioenergia sustentável na matriz energética até 2030. Adicionalmente, a restauração e o reflorestamento de 12 milhões de hectares de florestas fazem parte desses compromissos, juntamente com a meta de atingir aproximadamente 45% de participação de energias renováveis na composição da matriz energética até o mesmo ano.

Dentro do vasto setor energético, o segmento de transporte se destaca como o principal emissor de Gases de Efeito Estufa, ultrapassando até mesmo o setor elétrico, devido à sua considerável dependência de combustíveis provenientes de fontes fósseis (ESPÍNDOLA, 2020). As emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) são um reflexo direto do padrão de consumo de energia. No contexto dos diferentes setores energéticos no Brasil, o setor de transporte destaca-se como o maior contribuinte para as emissões de CO₂ na atmosfera. No ano de 2016, os meios de transporte mais utilizados no país resultaram em quantidades expressivas de CO₂ liberadas, sendo principalmente o transporte rodoviário (182,9 Mt), seguido pelo aéreo (10,0 Mt), ferroviário (2,7 Mt) e hidroviário (2,3 Mt). O transporte rodoviário, em particular, sobressai-se com uma participação significativa, respondendo por 92% das emissões totais de CO₂. Além disso, há uma distribuição equilibrada entre as emissões provenientes do transporte de cargas (99,7 Mt) e do transporte de passageiros (98,2 Mt) (SEEG, 2018). Esses dados estão ilustrados na figura 11

Figura 11 - Diagrama esquemático das emissões de CO₂ dos transportes no Brasil em 2016.



Fonte: SEEG (2018)

Concomitante a isso, tem-se um fator antagônico ao que se está procurando, onde AURANGZEB et al. (2014), afirma que a pavimentação com asfalto convencional de mistura quente é comum na construção e conservação de estradas, porém, ela gera significativas emissões de CO₂, CH₄ e N₂O. É crucial para a pesquisa em rodovias avançar na expansão e melhoria dos modelos utilizados, pois isso é fundamental para desenvolver pavimentos que tenham um impacto ambiental reduzido (ESPÍNDOLA, 2020).

A indústria da construção consome uma quantidade considerável de energia e recursos naturais. Nesse sentido, a edificação e a preservação de um sistema viário exercem um impacto significativo no ambiente (GRAEL; BEZERRA 2017). Como os gastos com manutenção consomem cerca de metade dos recursos anuais destinados às infraestruturas rodoviárias, é fundamental priorizar a eficiência nessa área. Grande parte dos investimentos em estradas está associada à extração de matérias-primas, à mão de obra empregada na execução e ao transporte de materiais, os quais compõem a maior parcela dos custos de manutenção e operação (LIMA, 2007).

Para determinar o método com o menor impacto, é essencial levar em conta diversos indicadores de impacto ambiental, já que a contribuição de cada fase na avaliação do ciclo de vida varia consideravelmente de acordo com cada parâmetro analisado. A interação entre altos volumes de tráfego e o desenho geométrico acarreta variações no nível de sustentabilidade ambiental. Portanto, é crucial integrar critérios sociais e econômicos na avaliação global de projetos viários (TRUNZO; MORETTI; D'ANDREA, 2019). Ao examinar a avaliação do ciclo de vida desde a construção até o uso, constata-se que estradas sem necessidade de túneis e pontes apresentam menor impacto ambiental. Os pavimentos flexíveis mostram impactos iniciais mais baixos em comparação aos pavimentos rígidos; contudo, em análises de longo prazo, observa-se um comportamento oposto (MORETTI, 2022).

Através da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), é possível quantificar o impacto dos pavimentos, visando identificar estratégias para minimizar o impacto ambiental desse extenso sistema de infraestrutura civil. O termo "ciclo de vida" refere-se às principais atividades ao longo de toda a cadeia produtiva do pavimento, desde a obtenção de materiais, construção, uso e manutenção até o seu descarte final (SANTERO; LOIJOS; OCHSENDORF, 2013). Esta metodologia é empregada para avaliar o potencial impacto ambiental associado às diversas etapas de vida do pavimento, mas é essencial definir claramente o objetivo e o escopo do "ciclo de vida do pavimento" a ser estudado (AURANGZEB et al., 2014).

A análise do ciclo de vida e a avaliação do impacto ambiental de pavimentos rodoviários, abrangendo aspectos como coprodutos ou reciclagem ao fim de sua vida útil,

mesmo em estágio de desenvolvimento contínuo, contribuem para uma tomada de decisão mais transparente. Entretanto, o impacto da metodologia escolhida nos resultados ainda carece de uma exploração mais aprofundada (HUANG; SPRAY; PARRY, 2013).

A construção de rodovias desempenha um papel crucial na economia e na conectividade das regiões, porém, seu impacto ambiental não pode ser desprezado. A emissão de gases de efeito estufa proveniente da construção e manutenção de estradas é um desafio significativo. A utilização do método abordado no presente trabalho permite escolhas mais eficientes que visam não apenas a redução de custos, mas também a diminuição do impacto ambiental.

Além disso, o método analisa de forma abrangente o ciclo de vida completo da rodovia, desde a extração de materiais até o descarte final. Essa análise holística permite uma compreensão mais profunda dos impactos ambientais associados à construção da estrada, permitindo a identificação de áreas onde a redução das emissões de gases de efeito estufa pode ser alcançada. Através da seleção de materiais mais sustentáveis, técnicas de construção eficientes e práticas de manutenção de baixo impacto, é possível mitigar os efeitos negativos sobre o meio ambiente.

Portanto, a aplicação do LCC não apenas ajuda a reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas também promove uma abordagem mais consciente e sustentável na construção de rodovias. Ao considerar não apenas o aspecto financeiro, mas também os impactos ambientais, torna possível desenvolver rodovias mais eficientes, duráveis e com menor impacto ambiental, contribuindo assim para um meio ambiente mais sustentável.

16 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs abordar, por meio de uma revisão bibliográfica, a metodologia *Life Cycle Costing*. Evidenciando os benefícios e sintetizando seus conceitos para estimular futuras investigações de viabilidade e aplicabilidade, buscando assim, oferecer uma base fundamentada para a compreensão.

16.1 Conclusão Final

Ao longo do ciclo de vida das rodovias, observam-se impactos ambientais consideráveis, principalmente durante a fase em que os usuários as utilizam, resultando em um consumo significativo de combustíveis fósseis, cuja disponibilidade vem se tornando cada vez mais limitada. O propósito deste estudo foi direcionado especialmente a entender como aplicar a metodologia do LCC pode afetar a implementação de rodovias, integrando esse aspecto em uma nova abordagem de análise do ciclo de vida. O objetivo foi possibilitar a compreensão econômica e ambiental nas diversas etapas da infraestrutura de transporte, buscando identificar alternativas cabíveis aos métodos tradicionais constantemente utilizados.

Dessa forma, compreender o impacto da metodologia *Life Cycle Costing* aplicada às rodovias revela uma transformação crítica na maneira como se encara a gestão dessas infraestruturas tão fundamentais para o desenvolvimento econômico e social de um país. Esse trabalho enfatizou que ir além dos custos iniciais de construção e considerar todos os gastos em todas as etapas, não apenas reconfigura a forma como as decisões são tomadas nos setores públicos e privados, mas também aprimora a visão de sustentabilidade e eficiência econômica no setor rodoviário.

A iminência de sua utilização, reside na capacidade do LCC superar a contabilidade convencional e integrar não apenas os custos financeiros de um projeto, mas também os impactos ambientais, sociais e econômicos que a implementação ou reabilitação de uma nova rodovia constitui ao longo do seu tempo de vida. Esta abordagem oferece uma ampla perspectiva que vai além de aspectos tradicionalmente conhecidos, permitindo uma gestão mais eficaz dos recursos, alocação mais inteligente de investimentos e identificação de estratégias que minimizem a geração de passivos ao meio ambiente.

Ao alinhar viabilidade econômica com sustentabilidade, é possível afirmar que o LCC surge como uma ferramenta capaz de promover a economia eficiente e propor projetos que entreguem uma durabilidade maior das rodovias. É incontestável que vai além de uma

metodologia de custeio, é um instrumento que fundamenta escolhas estratégicas, fornecendo uma compreensão detalhada dos custos e dos benefícios ao longo do tempo, direcionando investimentos para melhorias reais e sustentáveis.

À vista disso, a aplicação do *Life Cycle Costing* não só aprimora a gestão financeira das rodovias, mas também representa uma mudança pragmática na maneira como se encara a implementação, desenvolvimento, manutenção e reabilitação das rodovias. Sua utilização não apenas beneficia a economia do órgão público ou o fluxo de caixa da empresa privada, além da eficiência operacional, mas também promove um ambiente mais sustentável, assegurando que as decisões de hoje contribuam para um legado de infraestruturas viárias duradouras e ecologicamente responsáveis.

16.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Embora as pesquisas, artigos e livros anteriores a este, terem oferecido esclarecimentos valiosos sobre pavimentos, custos gerais envolvendo um ativo de tamanha importância, além do viés sustentável, é vital reconhecer a ampla gama de variáveis que impactam esse tema, especialmente no que diz respeito a uma economia saudável para um órgão público ou uma empresa privada, assim como um caráter sustentável, voltado para diminuição de impactos ambientais. Explorar a fundo essa complexidade é crucial para o futuro, uma vez que não é exequível conter todos esses elementos neste estudo em específico.

A consideração dos impactos ambientais associados à construção e execução de rodovias, juntamente com a busca por soluções que minimizem esses efeitos, representa um desafio significativo e um ponto chave para o avanço da engenharia rodoviária de forma sustentável. Portanto, há uma necessidade premente de investigação mais aprofundada para compreender melhor como os pavimentos podem ser projetados, construídos e mantidos levando em consideração não apenas a sua durabilidade e segurança, mas também seu impacto ambiental a longo prazo.

Como sugestão para sequência à metodologia aqui desenvolvida, percebe-se que é de grande valia examinar e integrar outros elementos que influenciam diretamente nas fases operacionais das rodovias, como detalhamento mais aprofundado dos impactos ambientais e a redução dos mesmos, além dos caminhos que seriam necessários para chegar em um objetivo pré-determinado.

Além disso, percebeu-se que, para que seja possível se desprender apenas da teoria, é de uma suma importância aplicar a metodologia do LCC em colaboração com os órgãos

responsáveis pelas rodovias, especialmente no que diz respeito a novos projetos de implementação rodoviária ou projetos de manutenção à pavimentação. Estudos de caso, baseados à realidade, com dados e premissas oriundas do campo, números reais e práticos, permitiria uma avaliação minuciosa de todas as vantagens inerentes a essa nova abordagem, contribuindo para uma gestão mais abrangente e sustentável das rodovias.

17 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, A. B. DE N. T. **NORMA DNIT 006/2003 - PRO**, Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos - Procedimento. 2003.

ACV. Disponível em: <<https://acv.ibict.br/acv/historico-da-acv/>>. Acesso em: 5 dez. 2023.

AGUIAR, F. D. **Avaliação Funcional e Estrutural do Pavimento Flexível no Segmento Monitorado de Itapoá**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

ALBANO, J. F. **Efeitos dos Excessos de Carga Sobre a Durabilidade de Pavimentos**. 2005.

ANASTASIOU, E. K.; A. LIAPIS, I. P. Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. **ScienceDirect**, maio 2015.

ANTT, AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Manual de Fiscalização de Rodovias Federais**. 2016.

ARANGO, L. **Calibração e Aferição do Modelo HDM-4 para as Condições da Rede de Rodovias do Brasil**, (s.d.).

AURANGZEB, Q. et al. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. 2014.

Avaliação de pavimentos. Disponível em: <<http://pavesys.com.br/avaliacao-de-pavimentos/>>. Acesso em: 28 nov. 2023.

AVALOS, M. S. **Qualidade de viagens em rodovias e consequências de reconstrução e manutenção**. Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, 2005.

BALARINE, O. F. O. **Tópicos de Matemática Financeira e Engenharia Econômica**. Revista e Ampliada, 2004.

BALLARD, G.; HOWELL, G. A. **Shielding Production: An Essential Step in Production Control**. 1997.

BLASI, G. F. **Proposta De Procedimentos Para A Elaboração De Relatórios De Controle Ambiental Visando A Regularização Ambiental De Rodovias Federais Em Operação**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

BNDES Hub de Projetos. Disponível em: <<https://hubdeprojetos.bndes.gov.br/pt/setores/Rodovias>>. Acesso em: 17 nov. 2023.

BOUSSABAIN, A.; KIRKHAM, R. **Whole life-cycle costing: Risk and risk responses**. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Blackwell, 2008.

BROWN, P.; SONDALINI, M. **The Evolution Of Maintenance Practices**. 2013.

BROWN, R. J.; YANUCK, R. R. **Introduction to Life Cycle Costing**. The Fairmont Press, 1985.

CHEHOVITS, J.; GALEHOUSE, L. **Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements**. 2010.

CHIU, C.-T.; HSU, T.-H.; YANG, W.-F. **Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements**. 2008.

CNT, CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE, **Anuário CNT do Transporte**. 2022

COUTINHO, T. **O que é VPL: aprenda a calcular o ganho real do seu investimento!** Disponível em: <<https://www.voitto.com.br/blog/artigo/o-que-e-vpl>>. Acesso em: 24 out. 2023.

CURRAN, M. A. **Life Cycle Assessment: Principles And Practice**. 2006.

Custo de Oportunidade: entenda o conceito e como calcular. Disponível em: <<https://www.onze.com.br/blog/custo-de-oportunidade-calcular/>>. Acesso em: 5 dez. 2023.

DA COSTA ARAÚJO, J. P. **Avaliação da sustentabilidade de estruturas e materiais de pavimentos rodoviários**. Universidade do Minho - Escola de Engenharia, jun. 2016.

DE CARVALHO, E. M. **Bens Públicos de Infra-estrutura: um estudo qualitativo das práticas relacionadas ao seu reconhecimento e evidenciação contábil**. 2004.

DE PESQUISA ENERGÉTICA, E. **Índice Custo Benefício (ICB) de Empreendimentos de Geração Termelétrica**. 2018.

DER/PR, D. DE E. DE R. DO E. DO P. **Manual de instruções ambientais para obras rodoviárias**. 2000.

DER/SP, D. DE E. DE R.-S. P. **Estudos Geotécnicos**. 2006.

DHILLON, B. S. **Life cycle costing for engineers**. Londres, England: CRC Press, 2010.

DIONÍSIO, J. M. M. **Modelo de Gestão Económica do Ciclo de Vida de um Ativo**. Instituto Superior De Engenharia De Lisboa, 2020.

DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. 1981.

DNIT, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual De Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2006a.

DNIT, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Estudos de Tráfego**. 2006b.

DNIT, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários**. 2006c.

DNIT, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual para atividades ambientais rodoviárias**. 2006.

DNIT, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual De Projeto Geométrico De Travessias Urbanas**. 2010.

DNIT, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Calibração E Aferição Do Modelo Hdm-4 Para As Condições Da Rede De Rodovias Do Brasil**. (s.d.)

ECYCLE, E. **CO2: definição e impactos do dióxido de carbono**. , 31 mar. 2023. . Acesso em: 10 nov. 2023

EMBLEMSVAG, J.; JAN, G.; EMBLEMSV. **Life-Cycle Costing**. Wiley, 2003.

ESPÍNDOLA, G. L. **Redução das emissões de CO2 do setor de transportes brasileiro aplicando a metodologia de Diagrama de Fontes de Carbono**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

GITMAN, L. J. **Princípios de Administração Financeira**. Always Learning, 2010.

GOVERNO FEDERAL. **HDM-4**. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria/hdm4.pdf>>.

GRAEL, P. F. F.; BEZERRA, B. S. Sistema de Produto para a Avaliação de Ciclo de Vida para Construção de Rodovias. **International Workshop Advances in Cleaner Production**, 2017.

GUIMARAES, M. M. et al. **Engenharia de Pavimentação e suas Técnicas Construtivas**. 2021.

HUANG, Y.; SPRAY, A.; PARRY, T. Sensitivity analysis of methodological choices in road pavement LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2013.

INNPROBIO. Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC). **Forum For Bio-Based Innovation In Public Procurement**, (s.d.)

JUNQUEIRA, G. **Fluxo de caixa na construção civil, como organizar?** Disponível em: <<https://maiscontroleerp.com.br/fluxo-de-caixa-na-construcao-civil/>>. Acesso em: 29 nov. 2023.

KAPLAN, R. S.; ANDERSON, S. R. **Time-driven activity-based costing: A simpler and more powerful path to higher profits**. Boston, MA, USA: Harvard Business Review Press, 2007.

KLOPFER, W.; GRAHL, B. **Life cycle assessment (LCA): A guide to best practice**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag, 2014.

LIMA, Â. M. F. **Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil: Inserção e perspectivas**. Universidade Federal da Bahia, 2007.

LUVIZÃO, G.; TRICHÊS, G. Case Study on Life Cycle Assessment Applied to Road Restoration Methods. **Sustainability**, abr. 2023.

MÁRQUEZ, A. C. **The Maintenance Management Framework**. Springer, 2009.

MEARIG, T.; MORRIS, L. **Life Cycle Cost Analysis Handbook**. 2018.

MeDiNa. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina>>. Acesso em: 16 nov. 2023.

MMA, M. DO M. A. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoesunidas>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

MMA, M. DO M. A. **Acordo de Paris**. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>>. Acesso em: 13 nov. 2023.

MORETTI, L. How road cross-sections affect the environmental impacts from cradle to grave. **Cleaner Environmental Systems**, 2022.

NAKAGAWA, M. **Gestão Estratégica de Custos - Conceitos, Sistemas e Implementação**. Atlas, 1991.

NEGRÃO, D. P. **Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do Tipo RET para Aplicações em Pavimentos**. Universidade de São Paulo, 2006.

NOGUEIRA, A. A. R. **Análise Da Relação Da Geometria De Rodovias E Acidentes Envolvendo Veículos De Carga**. Escola de Engenharia De São Carlos, 1995.

Novo informe da CNT revela as vantagens do sistema de pedágio free-flow. Disponível em: <<https://cnt.org.br/cnt-revela-vantagens-sistema-pedagio-free-flow>>. Acesso em: 5 dez. 2023.

NUNES, A. F. **APLICAÇÃO DE ASFALTO MODIFICADO COM POLÍMEROS**. CENTRO UNIVERSITÁRIO DO CERRADO PATROCÍNIO, 2018.

NUNES, D. F. **Procedimento para Análise de Sensibilidade do Programa HDM-4**. Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, 2012.

OPENLCA. **Open Source Life Cycle Assesment Software**. Disponível em: <www.openlca.org>. Acesso em: 19 nov. 2023.

PEDROZO, L. G. **Custos Da Infra-Estrutura Rodoviária**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

PEREIRA, L. **Custo de Oportunidade**. 2017 Disponível em: <<https://www.dicionariofinanceiro.com/custo-de-oportunidade/>>. Acesso em: 02 out. 2023.

PIMENTA, A. F. F. et al. **Gestão para o licenciamento ambiental de obras rodoviárias: conceitos e procedimentos**. Departamento de Transportes da Universidade Federal do Paraná, 2014.

Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/cnt-divulga-estudo-por-que-pavimento-rodovias-brasil-nao-duram-resultados>>. Acesso em: 29 set. 2023.

PORTARIA, N.; DE JULHO DE, D. E. Nº **289**, sexta-feira, **19 de julho de 2013** ISSN **1677-7042 63**. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/PT0289-160713.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

PRICEWATERHOUSECOOPERS. **Governança e compliance regulatório**. Disponível em: <<https://www.pwc.com.br/pt/consultoria-negocios/modelagem-de-risco-e-analise-de-dados/governanca-e-compliance-regulatorio.html>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

PROADAPTA. Levantamento de impactos e riscos climáticos sobre a infraestrutura federal de transportes terrestres (rodoviário e ferroviário) existente e projetada. **Adaptação à Mudança do Clima**, dez. 2021.

SANTERO, N.; LOIJOS, A.; OCHSENDORF, J. Greenhouse Gas Emissions Reduction Opportunities for Concrete Pavements. **Journal of Industrial Ecology**, 2013.

SEEG, S. DE E. DE E. DE G. **Tabela Geral das Emissões**. Disponível em: <<https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-emissions-by-sector-energy>>. Acesso em: 05 nov. 2023.

SICRO: o que é e como utilizar a tabela do DNIT. Disponível em: <<https://orcafascio.com/papodeengenheiro/sicro/>>. Acesso em: 5 dez. 2023.

SILVA, A. C. G.; DA LUZ, C. C.; RATTON, E. SISTEMA DE GESTÃO DE PASSIVOS AMBIENTAIS. **X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, 2019.

Somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentada>>. Acesso em: 5 dez. 2023.

TAVARES, L. **Administração Moderna da Manutenção**. Novo Polo Publicações, 1999.

TORRES, O. F. F. **Fundamentos da Engenharia Econômica e da Análise Econômica de Projetos**. Cengage Learning, 2014.

TRUNZO, G.; MORETTI, L.; D'ANDREA, A. Life Cycle Analysis of Road Construction and Use. **Sustainability**, 2019.

WARREN MAGAZINE. **Taxa Interna de Retorno (TIR): o que é, por que importa e como calcular.** Disponível em: <<https://warren.com.br/magazine/taxa-interna-de-retorno-tir/>>. Acesso em: 16 out. 2023.

WOODWARD, D. G. Life cycle costing-theory, information acquisition and application. **International Journal Of Management**, 1997.

YOSHITAKE, M. Gestão de Custos do Ciclo de Vida de um Ativo. **II Congresso Brasileiro de Gestão Estratégica de Custos**, 1995.

ZAMPOLLI, M. Gestão de Ativos, Guia para aplicação da norma ABNT NBR ISO 55001. 2015.

ZANIOLO, L.; COLZANI, P. F. W. **Protocolo de Quioto e o Mercado De Carbono.** Universidade Do Vale Do Itajaí, 2008.

Disponível em: <<https://www.buildingecology.com/sustainability/life-cycle-assessment/>>. Acesso em: 4 dez. 2023.