



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA CAROLINA SECUNDES DE AMORIM

**ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA DAS FERRAMENTAS DE CLASSIFICAÇÃO DE
SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA DO PAVIMENTO**

RECIFE
2024

ANA CAROLINA SECUNDES DE AMORIM

**ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA DAS FERRAMENTAS DE CLASSIFICAÇÃO DE
SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA DO PAVIMENTO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Reuber Arrais Freire.

RECIFE
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Amorim, Ana Carolina Secundes de.

Análise bibliográfica das ferramentas de classificação de sustentabilidade do ciclo de vida do pavimento / Ana Carolina Secundes de Amorim. - Recife, 2024.

71p : il., tab.

Orientador(a): Reuber Arrais Freire

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Ferramentas. 2. Classificação. 3. Pavimento. 4. Sustentabilidade. 5. Análise do Ciclo de Vida. I. Freire, Reuber Arrais. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

ANA CAROLINA SECUNDES DE AMORIM

Análise bibliográfica das ferramentas de classificação de sustentabilidade do ciclo de vida do pavimento

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Transportes.

Aprovado em: 19/04/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Reuber Arrais Freire
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Maurício Oliveira de Andrade
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Lyneker Souza de Moura
Universidade Federal da Pernambuco - UFPE

Em memória do meu pai, Ariovaldo Amorim, cuja inspiração moldou não apenas este trabalho, mas cada aspecto da minha vida. Sua determinação, gentileza e força continuam sendo a luz que me guia. Seu amor permanece para sempre vivo em minha mente e coração, inspirando-me a honrar seu legado em tudo o que faço.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por guiar sempre meus passos nos momentos de dificuldade enfrentados neste percurso, por ter me dado saúde e forças para chegar até o final.

À minha mãe, Maria Aparecida, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando incondicionalmente e sendo meu maior incentivo. Seu amor foi o alicerce que sustentou minha jornada até aqui. Ao meu padrasto e aos meus irmãos, por acreditarem no meu potencial. Minha eterna gratidão, vocês são os meus pilares.

Ao meu noivo, Thiago Costa, por ser meu companheiro de vida e por estar ao meu lado durante esta jornada. Sua compreensão, paciência e apoio me encorajaram a superar meus limites.

Aos meus amigos, pelos momentos de descontração que aliviaram o peso das responsabilidades, me ajudaram a manter o ânimo e a perseverança em momentos difíceis. Em especial, à Mayra Freire e Rickya Cavalcanti, que me auxiliaram de uma forma imensurável nessa última etapa. Sem a cooperação de vocês, não teria sido possível chegar até aqui.

Ao meu professor orientador, Reuber Freire, expresso minha sincera gratidão por sua orientação, paciência e pela dedicação em me ajudar a desenvolver este trabalho da melhor forma possível.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho e para o meu desenvolvimento acadêmico. Cada palavra de apoio, gesto de gentileza e momento de colaboração foi apreciado e valorizado.

Este trabalho é o resultado de muito esforço e não seria possível sem o apoio e contribuição de cada um de vocês. Por isso, meu mais profundo reconhecimento e gratidão.

RESUMO

A sustentabilidade na concepção e construção de rodovias, especialmente no que diz respeito ao pavimento, é uma possibilidade tangível. Dentro desse contexto, a análise do ciclo de vida (ACV) dos pavimentos representam caminhos para avaliar aspectos relacionados à sustentabilidade de soluções de pavimentação, no aspecto ambiental, econômico e social. Neste estudo, foi realizada uma análise bibliográfica com enfoque nas ferramentas de classificação de sustentabilidade do ciclo de vida do pavimento, identificando suas características, aplicações, vantagens e limitações e seu impacto na tomada de decisão durante o planejamento, projeto e execução de pavimentos rodoviários. Após a análise e comparação dos dados, foi realizado o cálculo da porcentagem dos critérios das ferramentas relacionados diretamente a ACV do pavimento. De maneira geral, os resultados obtidos apontam a ferramenta *GreenPave* com maior relação com o pavimento (81%). Como vantagem, a ferramenta valida o uso de pavimentos específicos, facilitando o olhar cíclico de extração, produção, transporte e aplicação de materiais. A avaliação cíclica é fundamental para a uniformização, confiabilidade e praticidade das análises. Entretanto, sua limitação está no detrimento dos detalhes, pois sua estrutura de critérios é curta, dificultando o consenso sobre a precisão da avaliação. Para isto, pode ser necessário o uso de múltiplas abordagens, que considerem diferentes aspectos e perspectivas, como ferramentas de avaliação ambiental, certificações de construções sustentáveis, análise do ciclo de vida dos materiais, avaliação de impacto social, entre outras. Reter processos densos em uma ferramenta apenas é hoje um desafio, pois necessita-se: abrangência, complementaridade, validação cruzada e adaptação ao contexto.

Palavras-Chave: Ferramentas; Classificação; Pavimento; Sustentabilidade; Análise do Ciclo de Vida.

ABSTRACT

Sustainability in the design and construction of roads, especially with regard to sidewalks, is a tangible possibility. Within this context, the life cycle analysis (LCA) of sidewalks represents ways of evaluating aspects related to the sustainability of paving solutions in environmental, economic and social terms. In this study, a literature review was carried out focusing on sidewalk life cycle sustainability classification tools, identifying their characteristics, applications, advantages and limitations and their impact on decision-making during the planning, design and execution of road sidewalks. After analyzing and comparing the data, the percentage of tool criteria directly related to the sidewalk's LCA was calculated. In general, the results show that the GreenPave tool has the greatest relationship with the sidewalk (81%). As an advantage, the tool validates the use of specific sidewalks, facilitating a cyclical look at the extraction, production, transportation and application of materials. Cyclical evaluation is fundamental for standardization, reliability and practicality of analysis. However, its limitation lies in the detriment of detail, as its criteria structure is short, making it difficult to reach a consensus on the accuracy of the assessment. For this, it may be necessary to use multiple approaches that consider different aspects and perspectives, such as environmental assessment tools, sustainable building certifications, life cycle analysis of materials, social impact assessment, among others. Retaining dense processes in a single tool is a challenge today, as it requires: comprehensiveness, complementarity, cross-validation and adaptation to the context.

Keywords: Assessment tools; Classification; Pavement; Sustainability; Life Cycle Analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de avaliação do ciclo de vida.....	18
Figura 2 - Ciclo de vida genérica de um sistema de produção.	19
Figura 3 - Fases do ciclo de vida do pavimento.	23
Figura 4 - Etapas na análise comparativa.	34
Figura 5 - Porcentagem das categorias do <i>Green Guide for Roads</i>	38
Figura 6 - Porcentagem das categorias do <i>GreenLITES</i>	40
Figura 7 - Porcentagem das categorias do <i>Greenroads</i>	45
Figura 8 - Porcentagem das categorias do <i>I-LAST</i>	47
Figura 9 - Porcentagem das categorias do <i>GreenPave</i>	49
Figura 10 - Influência do projeto geométrico na avaliação.	50
Figura 11 - Influência da mobilidade na avaliação.....	52
Figura 12 - Influência das operações de transporte na avaliação.....	53
Figura 13 - Influência dos impactos na comunidade na avaliação.....	55
Figura 14 - Influência da energia e atmosfera na avaliação.	56
Figura 15 - Influência dos materiais e recursos na avaliação.	58
Figura 16 - Influência da tecnologia de pavimentação na avaliação.....	59
Figura 17 - Influência das atividades de construção na avaliação.	60
Figura 18 - Influência da inovação na avaliação.....	61
Figura 19 - Influência da ACV do pavimento nas ferramentas.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ferramentas de classificação de sustentabilidade.	31
Quadro 2 - Categorias e critérios do <i>Green Guide for Roads</i>	36
Quadro 3 - Categorias e critérios do <i>GreenLITES</i>	39
Quadro 4 - Requisitos do projeto do <i>Greenroads</i>	43
Quadro 5 - Créditos voluntários do <i>Greenroads</i>	43
Quadro 6 - Categorias e critérios do <i>I-LAST</i>	45
Quadro 7 - Categorias e critérios do <i>GreenPave</i>	48
Quadro 8 - Critérios relacionados ao projeto geométrico.	50
Quadro 9 - Critérios relacionados à mobilidade.	51
Quadro 10 - Critérios relacionados às operações de transporte.	52
Quadro 11 - Critérios relacionados aos impactos na comunidade.	54
Quadro 12 - Critérios relacionados à energia e atmosfera.	56
Quadro 13 - Critérios relacionados aos materiais e recursos.	57
Quadro 14 - Critérios relacionados à tecnologia de pavimentação.	58
Quadro 15 - Critérios relacionados às atividades de construção.	59
Quadro 16 - Critérios relacionados à inovação.	60
Quadro 17 - Critérios relacionados diretamente com a ACV do pavimento.	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV)	17
2.2 CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DO PAVIMENTO.....	20
2.3 METODOLOGIAS DE ACV DE UM PAVIMENTO.....	22
2.4 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE.....	24
3. METODOLOGIA.....	30
3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	30
3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS.....	34
4. RESULTADOS.....	35
4.1 GREEN GUIDE FOR ROADS	36
4.2 GREENLITES	39
4.3 GREENROADS.....	41
4.4 I-LAST.....	45
4.5 GREENPAVE.....	47
4.6 ANÁLISES COMPARATIVAS	49
4.6.1 Projeto geométrico	49
4.6.2 Mobilidade.....	51
4.6.3 Operações de transporte.....	52
4.6.4 Impactos na comunidade	53
4.6.5 Energia e atmosfera	55
4.6.6 Materiais e recursos	57
4.6.7 Tecnologia de pavimentação.....	58
4.6.8 Atividades de construção	59
4.6.9 Inovação	60
4.7 RELAÇÃO DAS FERRAMENTAS COM A ACV DO PAVIMENTO	61

5. CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

O equilíbrio entre o desenvolvimento econômico, o bem-estar social e a preservação ambiental tem sido um dos principais desafios mundiais nos últimos anos e assim deve seguir nas próximas décadas. Com as recentes mudanças climáticas que avançam em ritmo acelerado e os impactos destas experimentadas pela população ao redor do mundo, tanto em níveis econômicos como em níveis sociais e ambientais, o crescimento sustentável passou a ser um tema de ampla relevância nos debates ao redor do mundo (Martine, 2015).

As preocupações com tais impactos têm feito com que diversos *stakeholders*, como os consumidores, os investidores e diversas organizações pressionem empresas e governos, por soluções que garantam viabilidade econômica ao passo preservem o meio ambiente e que promovam o bem-estar social. Desta forma, a exigência da sociedade sobre as indústrias na busca de soluções sustentáveis tem aumentado gradativamente (Munhoz, 2020).

A Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pela Organização das Nações Unidas, definiu em relatório intitulado Nosso Futuro Comum, publicado em 1987, o desenvolvimento sustentável como “o desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades”. No mesmo relatório, a comissão prossegue citando que essencialmente, o desenvolvimento sustentável é um processo de transformação onde a exploração dos recursos, a alocação dos investimentos, a orientação do avanço tecnológico e a reformulação institucional estão alinhadas e fortalecem o potencial presente e futuro para atender às aspirações e necessidades humanas (CMMAD, 1988).

Em pesquisa realizada pela Confederação Nacional da Indústria (CNI), foi evidenciado que os cidadãos brasileiros demonstram interesse em adquirir produtos de marcas que demonstrem preocupação com o meio ambiente e com a melhoria da qualidade de vida de todos os participantes ao longo da cadeia de produção. Este panorama tem sido explorado comercialmente por empresas tanto no Brasil quanto ao redor do mundo, utilizando-se de práticas sustentáveis como um diferencial competitivo, a fim de conquistar uma maior fatia do mercado (Fernandes, 2024).

Por outro lado, há uma tendência de que, em breve, as práticas sustentáveis deixem de ser vistas como um diferencial e passem a fazer parte do procedimento mundial. Em recente publicação em sua coluna publicada pela Folha de São Paulo, o renomado professor acadêmico Rodrigo Tavares, da *Nova School of Business and Economics* de Lisboa, defende que atualmente, as práticas, políticas e medidas de sustentabilidade não são mais vistas como elementos isolados ou restritos a um nicho específico, mas sim integradas a uma abordagem corporativa ou financeira que adota uma visão sistêmica (Tavares, 2024).

Sendo o Brasil um país de dimensões continentais, cujo principal meio de transporte é o rodoviário (Pereira, 2020), a avaliação da sustentabilidade no contexto da infraestrutura viária, especialmente no que diz respeito aos pavimentos, tem se tornado um elemento relevante que demanda cada vez mais estudos e pesquisas acadêmicos em busca de soluções sustentáveis.

Segundo a pesquisa mais recente da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023), o transporte rodoviário desempenha um papel central na estrutura de transporte do Brasil, respondendo por 65% do volume de carga e 95% do transporte de passageiros em todo o território nacional. Com tamanha representatividade, é de se esperar que este meio demande uma enorme quantidade de recursos e esteja intimamente ligado a impactos ambientais e socioeconômicos.

Neste ponto, o estudo acrescenta que é relevante destacar que a eficácia da infraestrutura viária está diretamente ligada ao impacto ambiental dos veículos que utilizam essas vias, assim como à manutenção da eficiência energética do setor de transporte. Rodovias de qualidade ajudam a reduzir a liberação significativa de gases de efeito estufa (GEE), que são catalisadores das mudanças climáticas e prejudiciais à saúde humana. Ao investir na infraestrutura rodoviária, o governo e outros intervenientes da cadeia logística apoiam os transportadores, contribuindo de forma eficaz para alcançar as metas de descarbonização do país estabelecidas no Acordo de Paris. Este acordo visa alcançar a neutralidade de emissões até o ano de 2050. Tal afirmação reforça o vínculo entre a qualidade dos pavimentos e a geração de poluentes (CNT, 2023).

Ainda segundo a CNT (2023), um dos principais obstáculos a serem superados para melhorar a qualidade da infraestrutura de transporte é a escassez de investimentos destinados à sua adequada manutenção e, em alguns casos, à

construção de novas vias. Desta forma, a pesquisa realizada reúne dados cruciais sobre a avaliação das condições das estradas, contribuindo para a formulação de uma agenda proativa voltada para o aprimoramento da infraestrutura e logística, aspectos essenciais para o progresso nacional.

Na mesma linha, Santos (2011) afirma que a qualidade das estradas construídas assume uma importância econômica significativa, visto que os custos adicionais associados ao transporte podem aumentar consideravelmente com uma infraestrutura rodoviária excessivamente deteriorada, reiterando a necessidade de investimentos com o objetivo de promover uma melhor qualidade deste modelo de transporte, resultando numa menor geração de impactos ambientais ainda que promova um desenvolvimento econômico.

Nesse cenário, ferramentas de classificação de sustentabilidade do ciclo de vida do pavimento desempenham um papel importante ao oferecer uma abordagem sistemática para avaliar os impactos ambientais, econômicos e sociais de diferentes empreendimentos de pavimentação ao longo de todo seu ciclo de vida.

O ciclo de vida do pavimento abrange desde a escolha e extração de matérias-primas, passando pela produção, construção, utilização e manutenção, até a sua eventual remoção e reciclagem. Ao considerar cada uma dessas fases, as ferramentas de classificação de sustentabilidade buscam fornecer uma visão ampla e equilibrada, permitindo que tomadores de decisão avaliem não apenas o desempenho técnico dos projetos, mas também seus impactos ambientais e socioeconômicos ao longo do tempo (Krau, 2021).

Este campo emergente de pesquisa e prática não apenas destaca a importância de escolhas mais sustentáveis na concepção e construção de pavimentos, mas também contribui para a promoção de práticas mais responsáveis e conscientes na gestão de infraestrutura viária. Ao compreender e utilizar ferramentas de classificação de sustentabilidade do ciclo de vida do pavimento, é possível tomar decisões mais bem informadas que visam à minimização do impacto ambiental, otimização de recursos e promoção de benefícios sociais, resultando em uma abordagem mais sustentável para o desenvolvimento e gestão de pavimentos rodoviários.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e suas implicações significativas não pode ser ignorada. Este cenário não apenas motiva um aumento na consciência global sobre a urgência de lidar com as mudanças climáticas, mas também ressalta a necessidade de investigar e compreender os fatores que contribuem para as emissões de gases de efeito estufa e demais poluentes atmosféricos.

No contexto global, a sustentabilidade assumiu protagonismo em várias áreas, incluindo a construção civil e a infraestrutura rodoviária. Com as crescentes preocupações ambientais, sociais e econômicas, é fundamental que os pavimentos sejam projetados, construídos e mantidos de maneira a minimizar seu impacto negativo no meio ambiente e na sociedade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desse estudo é realizar uma análise bibliográfica com um enfoque nas ferramentas de classificação de sustentabilidade do ciclo de vida do pavimento.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para isso os objetivos específicos traçados são:

- Identificar os critérios utilizados para a certificação, definindo qual categoria elas pertencem e com isso suas vantagens e limitações.
- Analisar as principais diferenças entre critérios e categorias das ferramentas.
- Compreender como as ferramentas consideram o ACV do pavimento em suas avaliações.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV)

De acordo com Zaumanis *et al.* (2011), os primeiros estudos que analisaram os aspectos do ciclo de vida de produtos e materiais surgiram na segunda metade do século XX, concentrando-se em temas como eficiência energética, consumo de matérias-primas e, em certa medida, a gestão de resíduos. Os pioneiros da análise do ciclo de vida (ACV) começaram a desenvolver seus estudos para analisar o ar, a terra, a água e as emissões de resíduos sólidos. Posteriormente, passaram a considerar também a energia, a utilização de recursos e as emissões químicas, com foco em produtos de consumo e embalagens, em vez de sistemas de infraestrutura complexos (Hunt *et al.*, 1992).

Desde 1969, esses estudos estavam focados no consumo de recursos ambientais. Paralelamente, na Europa, uma abordagem similar estava sendo desenvolvida e mais tarde se tornou conhecida como “balanço ecológico”. Em 1972, no Reino Unido, Ian Boustead (1996) calculou a energia total utilizada na produção de uma variedade de tipos de recipientes de bebidas, incluindo vidro, plástico, aço e alumínio. Nos anos seguintes, Boustead aprimorou sua metodologia para torná-la aplicável a uma variedade de materiais e, em 1979, publicou o Manual de Análise de Energia Industrial (European Environment Agency, 1997).

A partir de 1990, houve um notável aumento das atividades da ACV na Europa e nos EUA, o que se reflete no número de workshops e outros fóruns organizados principalmente pela SETAC - *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*. (Ferreira, 2024). O ciclo de vida de um produto engloba todas as etapas desde a sua fabricação, utilização, transporte e consumo até a sua disposição final ou reutilização. Normalmente, esse ciclo é composto por uma sequência de fases, iniciando-se com a extração e obtenção das matérias-primas, seguido pela concepção e projeto, produção, embalagem, distribuição, utilização, reutilização, reciclagem e, por último, a gestão de resíduos. (European Environment Agency, 1997).

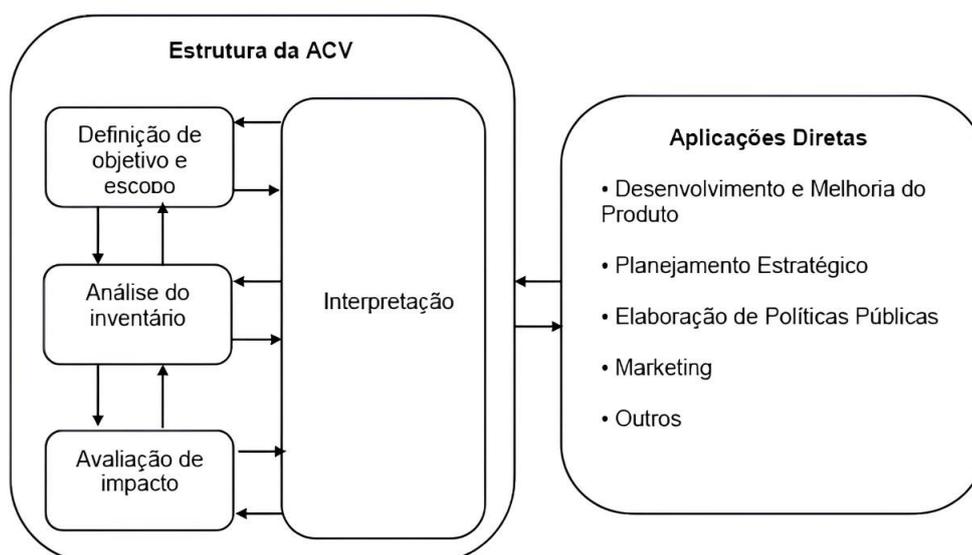
A ACV é a análise do fluxograma da produção de um produto em todas as fases do seu ciclo de vida. Ela representa uma família de ferramentas e técnicas que auxiliam na gestão ambiental a longo prazo e no desenvolvimento sustentável.

Enquanto alguns veem a ACV como um conceito de sustentabilidade, outros a enxergam como um conjunto de ferramentas práticas. Ambas as visões estão corretas, de depender do contexto.

A ACV é regulamentada pelas normas internacionais ISO 14040 (1997) e ISO 14044 (1997), que no Brasil são referidas como NBR ISO 14040 (2001) e NBR ISO 14044 (2001), respectivamente. Essas normas estabelecem a seguinte estrutura: definição de objetivo e escopo; análise de inventário de ciclo de vida; avaliação de impacto de ciclo de vida e interpretação ou análise comparativa (Silva, 2018).

De acordo com a norma ISO 14040:2001, a ACV pode ser descrita como o processo de compilar um inventário de entradas e saídas relevantes de um sistema de produto, avaliar os impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas, e interpretar os resultados das fases de análise de inventário e avaliação de impactos em relação aos objetivos do estudo. A estrutura pode ser compreendida a partir da Figura 1.

Figura 1 - Fases de avaliação do ciclo de vida.



Fonte: ABNT (2001).

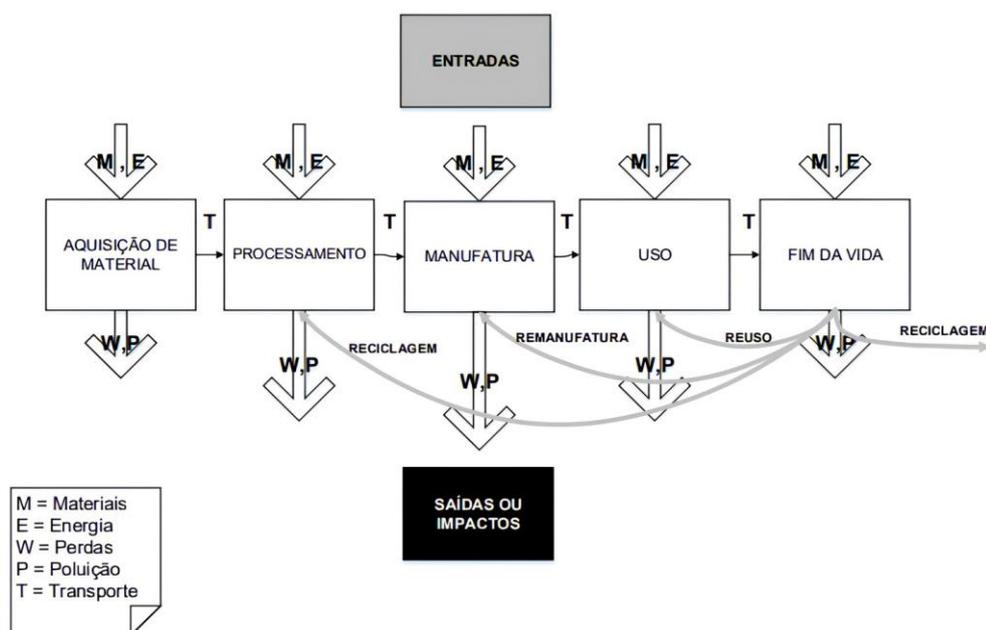
Os dados de saída referem-se aos produtos, subprodutos e rejeitos, sendo estes últimos subdivididos em emissões atmosféricas, efluentes líquidos, resíduos sólidos e rejeitos energéticos. Portanto, a elaboração do inventário do ciclo de vida (ICV) é responsável por produzir um conjunto de dados organizados como um

inventário, que são capazes de expressar quantitativamente os aspectos ambientais associados a um sistema de produto (Rebitzer *et al.*, 2004).

A ACV oferece uma abordagem abrangente para avaliar o impacto ambiental total de um produto específico (como a produção de uma tonelada de agregado, por exemplo) ou sistemas mais complexos de produtos ou processos (como o transporte desses produtos), examinando todos os parâmetros de entrada e saída ao longo de seu ciclo de vida (Medeiros, 2018).

A Figura 2 mostra um modelo genérico do ciclo de vida de um produto. Como pode ser visto, o ciclo de vida começa com a aquisição de matérias-primas, passa por vários estágios distintos, incluindo o processamento de material, fabricação e uso, e termina no chamado fim da vida.

Figura 2 - Ciclo de vida genérica de um sistema de produção.



Fonte: Figura adaptada de Kendall (2012).

Conforme ilustrado acima, o modelo de ACV considera os materiais e a energia como dados de entrada para cada um desses "estágios", enquanto os resíduos e a poluição são considerados como dados de saída. Esses últimos podem ser traduzidos em impactos ambientais e sociais. Além disso, observa-se que o fim da vida pode incluir a reciclagem, permitindo que o produto retorne ao seu ciclo de vida (Medeiros, 2018).

2.2 CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DO PAVIMENTO

No que diz respeito ao pavimento, as características funcionais dependem principalmente da composição da camada superior do pavimento (camada de revestimento), ou seja, estão relacionadas com as necessidades dos usuários em termos de conforto e segurança de circulação. Em relação à sua composição, é uma estrutura composta por várias camadas de espessura finita, feitas de diferentes materiais, construída após o terraplenagem. Na parte superior, são colocados os materiais com maior capacidade para garantir as qualidades superficiais desejadas, resistir às ações agressivas do tráfego e do ambiente, e proteger as camadas subjacentes (DNIT, 2006).

A principal função de um pavimento rodoviário é fornecer uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com conforto e segurança ao longo de um determinado período de vida do pavimento. Além disso, deve resistir às solicitações do tráfego e proteger o solo das intempéries. A segurança e o conforto da circulação rodoviária são assegurados por dois tipos de qualidade exigidos em um pavimento: a qualidade funcional e a qualidade estrutural (Braga, 2017).

A qualidade funcional de uma rodovia se manifesta em diferentes aspectos. Primeiramente, na segurança, que implica em oferecer condições seguras para os usuários. Isso inclui pistas bem-sinalizadas, curvas projetadas adequadamente, sistemas de drenagem eficazes para evitar acúmulos de água e iluminação adequada, especialmente em áreas de visibilidade reduzida. Em segundo lugar, na eficiência, que se refere à capacidade da estrada de permitir um fluxo de tráfego suave, minimizando congestionamentos e atrasos. Isso é alcançado através da concepção de vias de tráfego adequadas, interseções eficientes e acesso conveniente. Por fim, o conforto também é um aspecto crucial, que é garantido por superfícies de pavimento bem projetadas e mantidas, além de uma gestão eficaz do ruído e das vibrações (Balbo, 2027).

A qualidade estrutural de uma estrada está diretamente ligada à sua durabilidade, que é a capacidade de resistir ao desgaste provocado pelo tráfego, pelas condições climáticas e por outros fatores ambientais ao longo do tempo. Para que uma estrada seja durável, é necessário utilizar materiais de construção adequados, empregar técnicas de construção robustas e realizar manutenção

regularmente. Além disso, a resistência é fundamental, pois a estrada deve suportar o peso e a carga do tráfego sem apresentar danos estruturais significativos. A estabilidade também é crucial, garantindo que a estrada mantenha sua forma e integridade estrutural sob diversas condições, incluindo mudanças climáticas, movimentos de terra e outros eventos naturais (Branco *et al.*, 2006).

No entanto, de maneira geral, os pavimentos rodoviários são compostos por quatro camadas principais: a camada de revestimento, a base, a sub-base e o subleito. Os pavimentos rodoviários são categorizados em dois tipos, dependendo dos materiais e da deformabilidade das camadas: pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos. Já a seleção de um tipo específico de pavimento é baseada na intensidade do tráfego, nas condições do solo de fundação e na qualidade dos materiais disponíveis (Mello, 2016).

No caso dos pavimentos flexíveis, as camadas são compostas por materiais mais deformáveis que absorvem as cargas de forma mais lenta (Maia, 2012). A camada superior, composta de betume, fornece resistência à tração devido à sua natureza ligada, garantindo assim uma resistência à fadiga (Bernucci *et al.*, 2008). Quanto às camadas inferiores, estas são compostas por material granular não ligado e, juntamente com o solo de fundação, conferem ao pavimento resistência às tensões de compressão.

Os pavimentos rígidos são pavimentos com pouca deformação, onde a função estrutural principal é desempenhada por uma laje de concreto seguida de duas ou três camadas inferiores compostas por material granular. Devido à sua maior rigidez, esse tipo de pavimento distribui as cargas verticais sobre uma área maior e com pressões reduzidas (Amaral *et al.* 2021).

O desempenho de um pavimento rodoviário sob as exigências do tráfego e das condições climáticas é determinado pelas propriedades dos materiais empregados nas várias camadas que o compõem. As camadas betuminosas são principalmente submetidas à flexão e devem resistir aos esforços de tração, que podem resultar em fissuras por fadiga na superfície. Essas camadas também estão sujeitas a esforços tangenciais, a esforços cortantes e a esforços de compressão, que podem causar deformações permanentes (Silva *et al.*, 2015).

2.3 METODOLOGIAS DE ACV DE UM PAVIMENTO

Conforme mencionado por Walls e Smith (1998), a técnica ou ferramenta de ACV pode ser aplicada para diversos propósitos, tais como: identificar oportunidades para aprimorar o desempenho ambiental de produtos e sistemas de produção em diferentes etapas de seu ciclo de vida; fornecer informações e orientar as tomadas de decisão como parte do planejamento estratégico e da definição de prioridades; auxiliar na seleção de procedimentos e processos.

Nos últimos anos, ocorreu um crescente interesse em desenvolver projetos de pavimentos que sejam ecologicamente conscientes, devido à percepção de que os recursos utilizados pela humanidade são limitados. Dado que os pavimentos rodoviários são infraestruturas que causam impactos ambientais significativos durante a construção, utilização e reabilitação, é crucial buscar novas técnicas e processos de construção que minimizem esses impactos (Bataille *et al.*, 2016). A União Europeia estabeleceu como meta alcançar uma economia de baixo carbono e eficiente no uso de recursos até 2020. Dois temas prioritários para o futuro são melhorar a gestão de resíduos, abrangendo todas as fases do ciclo de vida desde a extração até a eliminação, e reduzir o consumo de energia através do aumento da eficiência energética (Guimarães, 2016).

Como citado anteriormente, a ACV é uma metodologia que visa avaliar os impactos ambientais associados a um produto, processo ou atividade ao longo de sua vida, identificando os materiais utilizados e quantificando a energia e os resíduos liberados no meio ambiente, com o objetivo de reduzir os impactos na atmosfera e os gastos energéticos. Entretanto, uma avaliação detalhada dos impactos ambientais de pavimentos requer informações de diversas fontes relacionadas às várias fases de seu ciclo de vida, e essas informações nem sempre estão disponíveis (Hora, 2022).

Devido à complexidade de obter dados relevantes e à falta de compreensão do sistema em estudo, a aplicação da ACV pode ser desafiadora, resultando em uma visão limitada do ciclo de vida. No caso de pavimentos rodoviários, normalmente, apenas as atividades de extração, produção, transporte e aplicação de materiais são consideradas. Os principais impactos ambientais considerados na ACV são a poluição do ar e a poluição da água (Hora, 2022).

A organização conceitual das metodologias de avaliação do ciclo de vida de um pavimento compreende cinco fases diferentes, como demonstradas na Figura 3.

Figura 3 - Fases do ciclo de vida do pavimento.



Fonte: Autor (2024).

- i) **A extração e produção** de matérias-primas marcam o início do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários. Nesta fase, os agregados são extraídos e triturados, e os ligantes e misturas são produzidos. Os impactos ambientais nessa etapa derivam de todos esses processos, bem como do transporte de materiais e misturas para o local da obra e para as instalações de produção. Isso inclui também o equipamento e as atividades relacionadas ao carregamento dos veículos.
- ii) **A fase de construção** de uma rodovia abrange uma série de processos, incluindo obras de terraplenagem, reforço do subleito, aplicação das camadas do pavimento e instalação de equipamentos essenciais, como iluminação, sinalização e cercas de segurança. Os impactos ambientais associados a esta fase incluem o consumo de combustível e as emissões atmosféricas provenientes das máquinas de pavimentação, bem como as emissões atmosféricas e a lixiviação de poluentes provenientes do pavimento e da terra em transformação.
- iii) **A fase de utilização** de um pavimento se inicia após a conclusão da fase de construção e se estende até o término da vida útil da infraestrutura. Durante essa fase, a estrada é utilizada por todos os veículos que trafegam sobre ela. Os impactos ambientais nessa fase são decorrentes do consumo de combustível e das emissões atmosféricas geradas pelo tráfego rodoviário, bem como da ocupação da terra.
- iv) **A fase de manutenção**, assim como a fase de utilização, se estende até o final da vida útil da infraestrutura, uma vez que está relacionada ao desgaste do pavimento. Durante essa fase, são realizadas operações na estrada para garantir que as condições adequadas do

pavimento sejam mantidas ao longo de sua vida útil. As operações de manutenção preventiva podem incluir a substituição da camada de desgaste ou a sobreposição do pavimento, dependendo da estratégia escolhida pela administração rodoviária. Os impactos ambientais associados ao desmantelamento da camada degradada são os mesmos que os da fase final de sua vida útil.

- v) **A fase de fim de vida** ocorre quando a infraestrutura atinge o final de sua vida útil de serviço. O procedimento geral, quando o pavimento chega a esta etapa, é realizar sua recuperação, demolição e remoção de materiais que ainda podem ser reciclados, ou simplesmente deixar a rodovia no local, dependendo da estratégia escolhida pela administração rodoviária. Nesta fase, os impactos ambientais associados podem ser muito diferentes, dependendo da estratégia de fim de vida escolhida.

2.4 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

Brundtland (1987), apresentado pela ONU, conceituou e introduziu o desenvolvimento sustentável pela primeira vez. Foi definido como um tipo de desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades.

Sustentabilidade é a preservação ou renovação dos recursos naturais, seja por meio de processos naturais ou artificiais. É um princípio que enfatiza a utilização racional dos recursos, minimizando o desperdício e promovendo práticas de recuperação e reciclagem. Ademais, a busca pela sustentabilidade pode incluir o avanço tecnológico para desenvolver substitutos mais eficazes para materiais finitos (Moura, 2000).

Para implementar esse conceito, as empresas devem se esforçar para minimizar os impactos ambientais de suas operações, como a redução das emissões de resíduos no meio ambiente e o uso de recursos naturais não renováveis. Além disso, devem promover o desenvolvimento econômico e social.

Kloepffer (2003) delimita a sustentabilidade em três pilares, ambiental, econômica e social. A primeira se refere à conservação e ao uso responsável dos

recursos naturais, minimizando o impacto ambiental das atividades humanas. A sustentabilidade econômica envolve práticas econômicas que garantem a viabilidade financeira a longo prazo, promovendo o desenvolvimento econômico sem comprometer os recursos futuros e a sustentabilidade social diz respeito à promoção da equidade e da justiça social, garantindo que as necessidades básicas das pessoas sejam atendidas e que todos tenham acesso a oportunidades de desenvolvimento e bem-estar.

Kloepffer (2008) destaca que o terceiro pilar da sustentabilidade, o social, ainda está em estágio inicial de desenvolvimento, apesar de não ser uma ideia nova. Existem várias dificuldades metodológicas associadas a essa dimensão. No entanto, há um número significativo de artigos científicos publicados sobre o assunto, o que é importante para estudos futuros mais abrangentes. Entre os três pilares da sustentabilidade, o social é o que mais necessita de novas metodologias para ser abordado de forma mais eficaz.

O autor lançou um editorial para discutir que esses componentes devem ser avaliados e equilibrados adequadamente. Ele enfatizou que os pesquisadores têm a responsabilidade de fornecer informações confiáveis. Este estudo pioneiro foi fundamental para futuras discussões sobre a avaliação da sustentabilidade, buscando mostrar os métodos baseados no ciclo de vida que têm potencial para tais avaliações. Com base nisso, em 2008 o autor integra os três pilares da sustentabilidade em uma equação conceitual:

$$ASCV = ACV + AECV + ACVS$$

Onde:

ASCV = avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida;

ACV = avaliação do ciclo de vida;

AECV = avaliação econômica do ciclo de vida;

ACVS = avaliação do ciclo de vida social.

A avaliação de sustentabilidade do ciclo de vida é definida como a avaliação de todos os impactos ambientais, econômicos e sociais, bem como seus respectivos benefícios, em processos de tomada de decisão. Seu objetivo é identificar e

selecionar os produtos mais sustentáveis, levando em consideração a análise de seu ciclo de vida.

Conforme Wahrlich *et al.* (2020), essa abordagem de avaliação já está sendo aplicada em várias situações distintas. Por exemplo, foi utilizada para avaliar o quadro de sustentabilidade do setor elétrico da Turquia, considerando diferentes tecnologias operacionais para comparar e avaliar quatro materiais típicos de tubulações de esgoto sob a perspectiva da sustentabilidade; identificar as opções mais sustentáveis entre as alternativas de eletricidade disponíveis no Reino Unido e analisar os impactos sociais, econômicos e ambientais em nível macro de tecnologias alternativas de veículos nos Estados Unidos.

Nos últimos anos, têm surgido diversas metodologias de avaliação da sustentabilidade de projetos de transporte em nível global, com destaque para sistemas de classificação e certificação. Essas abordagens empregam critérios, indicadores e métricas de desempenho alinhados a princípios, objetivos e metas estabelecidos (Amorim, 2019).

Um sistema de classificação deve ser considerado como uma dentre várias ferramentas disponíveis para auxiliar uma organização a mensurar, administrar e atingir seus objetivos de sustentabilidade. Tais sistemas permitem que equipes de projeto e construção determinem suas prioridades sustentáveis, ao mesmo tempo em que fornecem às partes interessadas um método para avaliar o desempenho (Pereira, 2016).

Os sistemas de classificação e certificação estabelecem critérios econômicos, sociais, ambientais, entre outros, para avaliar a sustentabilidade nos transportes, fundamentados principalmente em indicadores que servem como meios de avaliação. Esses sistemas atribuem créditos a escolhas ou práticas sustentáveis e, frequentemente, resultam em uma certificação. Em geral, tais sistemas são desenvolvidos para oferecer diretrizes, pontuações e possíveis recompensas para a incorporação de atributos sustentáveis em várias fases das infraestruturas de transporte, frequentemente em projetos rodoviários (Oliveira, Ruppenthal, 2020).

Um sistema de classificação pode promover resultados mais sustentáveis, comunicando seus resultados tanto internamente quanto ao público em geral, além de reconhecer e premiar organizações por suas práticas. Além disso, existe o

potencial de utilizar esses sistemas para *benchmarking* e para identificar áreas que possam ser aprimoradas (Pereira, 2016).

Ramani *et al.* (2011), apontam que os sistemas de classificação transmitem potencial por:

- i) Proporcionar uma unidade de medida comum (pontuação) para uma ampla variedade de soluções sustentáveis;
- ii) Avaliar a sustentabilidade, tornando-a realizável;
- iii) Facilitar a comunicação direta de metas, esforços e conquistas em sustentabilidade.

Entretanto, a literatura observa que os sistemas de classificação são frequentemente alvo de críticas, pois tendem a simplificar em detrimento dos detalhes, o que dificulta o consenso sobre quais itens devem ser incluídos ou excluídos. Além disso, tais sistemas não abrangem completamente todas as soluções sustentáveis disponíveis, e a busca por pontos dentro de um sistema de classificação pode impactar negativamente a qualidade do projeto (Amorim, 2019).

Bueno *et al.* (2013) também destacaram diversos problemas associados aos sistemas de classificação, que incluem:

- i) A ausência de um conjunto comum de critérios para permitir a comparação entre diferentes sistemas de classificação;
- ii) Falta de objetividade e transparência nos processos de seleção e ponderação dos critérios utilizados;
- iii) Utilização mais frequente como ferramentas de certificação do que como instrumentos eficazes para promover a sustentabilidade;
- iv) Ausência de base em métodos padronizados de avaliação de desempenho;
- v) Falta de participação de todas as partes interessadas ao longo do ciclo de vida do projeto;
- vi) O elevado número de indicadores geralmente utilizado, o que pode tornar o sistema complexo demais.

Por outro lado, conforme previamente abordado, a sustentabilidade é um conceito amplo e subjetivo, e, por isso, a utilização de ferramentas para sua avaliação é de extrema importância no processo de desenvolvimento de projetos de transporte. As tomadas de decisão estão cada vez mais incorporando conceitos de

sustentabilidade, considerando os impactos econômicos, sociais e ambientais a longo prazo. Como resultado, há uma crescente demanda por ferramentas de planejamento adequadas, com destaque para o uso de indicadores de transporte sustentáveis. Esses indicadores têm se mostrado instrumentos valiosos no nível de planejamento, fornecendo informações que podem ser utilizadas na formulação de planos, políticas e programas voltados à melhoria da qualidade de vida e à operacionalização de conceitos de sustentabilidade (Froufe, Melo, Soares, 2020).

A análise da literatura revela que uma grande parte das pesquisas sobre avaliação de sustentabilidade em transportes está centrada no uso de indicadores (ou medidas de desempenho), frequentemente combinados com outros métodos de avaliação. Os indicadores de sustentabilidade são ferramentas cruciais para medir e avaliar o progresso em direção ao desenvolvimento sustentável, sendo essenciais para embasar a formulação de políticas públicas e a tomada de decisões (Demarzo, 2007; Jappur, Franciscan, 2018; Rocha, 2012; Froufe, Melo, Soares, 2020).

Para alguns autores, o uso de indicadores é considerado crucial para processar informações diversas e complexas, permitindo a análise de realidades complexas por meio de uma representação numérica, gráfica e, portanto, mais acessível. De acordo com Costa (2003), os indicadores condensam uma grande quantidade de informações em um número apropriado de parâmetros para análise e tomada de decisão; traduzem conceitos abstratos e difíceis de mensurar em entidades operacionais e mensuráveis, fornecendo uma visão sintética de um fenômeno específico. Além disso, sua utilização permite identificar condições e tendências, destacando aspectos deficientes ou áreas que necessitam de intervenção.

Um indicador eficaz é capaz de alertar para um problema antes que ele se torne mais complexo e ajuda a identificar o que precisa ser feito para corrigi-lo. Os indicadores de sustentabilidade refletem a realidade de uma organização em três segmentos diferentes e intimamente interligados: econômico, social e ambiental. Seu objetivo é mostrar quão bem um sistema está funcionando. Se houver um problema, um indicador pode ajudar a determinar a direção a seguir para resolvê-lo. Os indicadores variam tanto quanto os tipos de sistemas que monitoram.

No entanto, segundo Minusculli e Reis (2020), existem algumas características comuns aos indicadores eficazes:

- i) São relevantes: mostram algo sobre o sistema que todos precisam saber;
- ii) São fáceis de entender, mesmo para pessoas que não são especialistas;
- iii) São confiáveis: a informação fornecida pelo indicador pode ser confiável;
- iv) São baseados em dados acessíveis: as informações estão disponíveis ou podem ser reunidas enquanto ainda há tempo para agir.

O objetivo principal dos indicadores é o de agregar e quantificar informações de uma maneira que sua significância fique mais aparente. Os indicadores simplificam as informações sobre fenômenos complexos tentando, com isso, melhorar o processo de comunicação. Os indicadores devem ser observados a partir de suas funções, que são: avaliar condições e tendências em relação a metas e objetivos; permitir a comparação entre lugares e situações; prover informações de advertência; antecipar futuras condições e tendências (Tunstall, 1992, 1994).

De acordo com Novis (2013), um indicador é uma relação matemática que mede, numericamente, atributos de um processo com o objetivo de comparar essa medida com metas numéricas estabelecidas. O processo de certificação estabelece critérios para verificar se o empreendimento atende aos padrões definidos pelo programa de certificação. Geralmente, as metodologias de avaliação são divididas em três grupos: um grupo baseado em sistemas estatísticos, outro centrado no cumprimento de critérios específicos e um terceiro focado na gestão e processos (Moreira *et al.*, 2020).

Tendo em vista a diversidade de metodologias de avaliação utilizadas, surge uma ponderação importante: será que uma única abordagem é capaz de abranger a complexidade do ambiente em que o empreendimento está inserido e analisar de forma abrangente toda a cadeia produtiva da construção civil? Essa reflexão é essencial para garantir a eficácia e relevância dos processos de certificação na busca pela qualidade e sustentabilidade dos empreendimentos, pois estas particularidades podem afetar determinados indicadores, tornando ineficientes os medidores se utilizados dentro de uma única metodologia (Moreira *et al.*, 2020).

3. METODOLOGIA

3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Este estudo emprega uma abordagem qualitativa que demanda uma análise abrangente do objeto de pesquisa, levando em conta tanto o contexto no qual está inserido quanto às características da sociedade à qual pertence. Além disso, a descrição das principais metodologias utilizadas na avaliação da sustentabilidade na ACV do pavimento foi realizada de forma exploratória e descritiva.

De acordo com Gil (2008), as pesquisas exploratórias representam a primeira fase de uma investigação mais abrangente, com o intuito de aperfeiçoar ideias e descobrir suposições predefinidas. Segundo o autor, esse tipo de estudo busca fornecer uma compreensão mais profunda do tema, frequentemente utilizando procedimentos como revisão bibliográfica, entrevistas com pessoas envolvidas com o problema pesquisado e análise de exemplos para elucidar o fenômeno estudado. Além disso, a pesquisa exploratória visa principalmente aprimorar conceitos, uma vez que seu planejamento é flexível e permite a consideração de diversos aspectos relacionados ao assunto em questão.

Ainda segundo Gil (2008), os estudos descritivos concentram-se em expor as características de certas populações, fenômenos ou na investigação das relações entre variáveis específicas. O autor também destaca que algumas pesquisas desse tipo vão além de apenas verificar a existência de uma relação entre as variáveis, buscando também determinar a natureza dessa relação.

A metodologia adotada para este estudo foca na análise bibliográfica das ferramentas de classificação de sustentabilidade na ACV de pavimentos. Inicialmente, realizou-se um levantamento abrangente de fontes bibliográficas em diversas plataformas acadêmicas, periódicos científicos e literatura técnica especializada. Esse processo permitiu a identificação das ferramentas de classificação mais relevantes e frequentemente empregadas no contexto da sustentabilidade em projetos de infraestrutura e transporte. Desta forma, foram selecionadas para este estudo aquelas que mais se adequam à aplicação no estudo de pavimentos. O Quadro 1 descreve as ferramentas de classificação de sustentabilidade inicialmente analisadas.

Quadro 1 - Ferramentas de classificação de sustentabilidade.

FERRAMENTA	PAÍS	DESCRIÇÃO
BREEAM Infrastructure (CEEQUAL)	Reino Unido	Sistema internacional de avaliação de sustentabilidade baseada em evidências, avaliação e prêmios para engenharia civil, infraestrutura, paisagismo e obras em espaços públicos.
EnvisionTM	Estados Unidos	Estrutura abrangente de 60 critérios que abrangem toda a gama de impactos ambientais, sociais e econômicos que devem ser avaliados para determinar como um projeto incorporou a sustentabilidade. Como uma ferramenta de orientação de planejamento e projeto, a <i>Envision</i> fornece métricas de sustentabilidade para todos os tipos de infraestrutura.
ELASTIC - Evaluative and Logical Approach to Sustainable Transport Indicator Compilation	Reino Unido	Estrutura para identificar e selecionar um subconjunto reduzido de indicadores de sustentabilidade de transporte com base em julgamentos das partes interessadas sobre seus pontos fortes metodológicos e relevância para os princípios-chave do transporte sustentável.
Green Guide for Roads	Canadá	Ferramenta que inclui áreas onde as práticas de sustentabilidade podem ser aplicadas, com uma descrição de requisitos e melhores práticas ou estratégias associadas. Aplica-se a todos os tipos de estradas urbanas e rurais e inclui considerações de sustentabilidade como melhor compatibilidade e habitabilidade; acessibilidade universal; equidade entre os meios de transporte; conservação de recursos; acessibilidade; e proteção ambiental.
GreenLITES - Green Leadership in Transport and Environmental Sustainability	Estados Unidos	Programa de auto certificação que distingue projetos e operações de transporte com base na extensão em que incorporam escolhas sustentáveis. Os projetos e operações são avaliados para práticas sustentáveis e, com base no total de créditos recebidos, é atribuído um nível de certificação.

GreenroadsTM	Estados Unidos	Sistema de classificação de sustentabilidade para projetos e construção de rodovias. Apresenta uma coleção de melhores práticas de sustentabilidade, chamada créditos. A obtenção de créditos gera pontos para uma pontuação geral que indica a sustentabilidade da rodovia.
I-LAST - Illinois Livable and Sustainable Transportation	Estados Unidos	Sistema de pontos para avaliar as medidas sustentáveis incluído em um projeto, que fornece uma lista abrangente de práticas que têm o potencial para trazer resultados sustentáveis para projetos rodoviários de todos os tamanhos e todas as fases de desenvolvimento do projeto (planejamento, projeto e construção).
INVEST - Infrastructure Voluntary Evaluation Sustainability Tool	Estados Unidos	Ferramenta de auto avaliação via Web com módulos: sistema de planejamento, desenvolvimento de projeto, operações e manutenção. Identifica as características das rodovias sustentáveis e fornece procedimentos e técnicas para ajudar as organizações a aplicarem melhores práticas de sustentabilidade.
Sustainability Enhancement Tool	Estados Unidos	Estrutura baseada em medição de desempenho e metodologia de avaliação para transporte sustentável, vinculada às metas de planejamento estratégico da agência de transporte. Aplica 12 medidas de desempenho no processo de planejamento de corredor rodoviário, incluindo medidas de congestionamento, segurança, modos alternativos e qualidade do ar, para abordar as metas e objetivos do plano estratégico.
Sustainable Corridor Rating System (SCRS)	Estados Unidos	Metodologia para sistemas de classificação aplicados a corredores urbanos. Visa alterar o comportamento dos profissionais de transporte e induzir práticas de transporte sustentável, definindo uma metodologia para o desenvolvimento de sistemas de classificação verde.
STARS - Sustainable Transportation Analysis & Rating System	Estados Unidos	Estrutura de planejamento integrado desenvolvida para ajudar planejadores, comunidades e tomadores de decisão a avaliar os impactos dos planos e projetos de transporte, identificar estratégias inovadoras e melhorar a tomada de decisão.

SUNRA - Sustainability - National Road Administrations	Europa	Sistema para melhorar o desempenho, fornecendo meios para considerar prioridades nacionais, questões importantes, preocupações de partes interessadas e estruturas organizacionais.
BE2ST-In-HighwaysTM - Building Environmentally and Economically Sustainable Transportation-Infrastructure-Highways	Estados Unidos	Sistema de classificação que emprega técnicas de análise do ciclo de vida para fornecer uma avaliação quantitativa da sustentabilidade ambiental e econômica dos projetos de rodovias. Com base na pontuação recebida, um projeto recebe um rótulo proporcional ao nível de sustentabilidade alcançado. Seu foco principal é quantificar o impacto na sustentabilidade do uso de materiais reciclados em pavimentos.
GreenPave	Canadá	Sistema de classificação simplificado baseado em <i>LEED</i> e <i>GreenRoads</i> , mas customizado para Ontário, com foco em componentes de pavimento. O objetivo é melhorar a sustentabilidade da infraestrutura de transportes através da concepção e seleção de alternativas de tratamento de pavimentos sustentáveis.
Infrastructure Sustainability (IS)	Austrália	O sistema apoia a obtenção de resultados sustentáveis no desenvolvimento de infraestrutura, avaliando e classificando o desempenho de sustentabilidade de um projeto. O processo de classificação envolve autoavaliação, seguido por verificação independente de um verificador nomeado pelo IS e, em seguida, pela certificação formal.

Fonte: Texto adaptado de Amorim (2019).

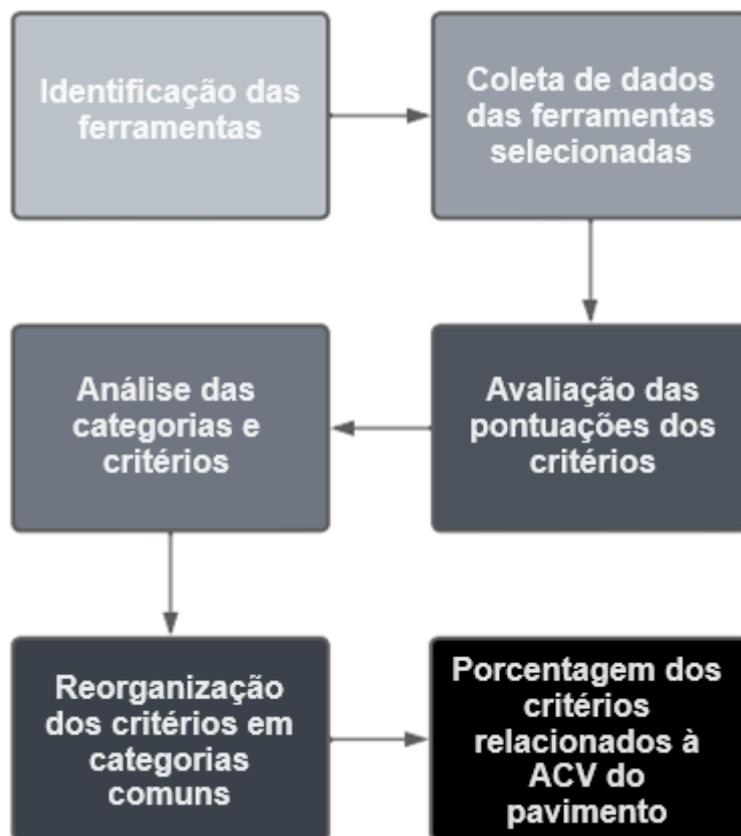
Como critério de seleção, optou-se por escolher as ferramentas que considerassem o ciclo de vida das rodovias, especificamente do pavimento. Esse critério foi estabelecido a fim de analisar aquelas que englobem desde a extração de matérias-primas até o descarte final, levando em conta os impactos ambientais, econômicos e sociais ao longo de todo o seu ciclo de vida.

Dessa forma, das 15 ferramentas encontradas, foram selecionadas 5 para análise, sendo essas *Green Guide for Roads*, *GreenLITES*, *Greenroads*, *I-LAST* e *GreenPave*. As demais têm ênfase em projetos de infraestrutura em geral ou na operação de transporte como um todo.

3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS

Para examinar as ferramentas *Green Guide for Roads*, *GreenLITES*, *Greenroads*, *I-LAST* e *GreenPave*, foi feito uma avaliação comparativa a partir de etapas metodológicas que visam à coleta e organização sistemática dos dados. As etapas desse processo foram descritas na Figura 4.

Figura 4 - Etapas na análise comparativa.



Fonte: Autor (2024).

- i) **Identificação das ferramentas:** as ferramentas pertinentes para análise foram identificadas de acordo com os critérios de avaliação de sustentabilidade nos projetos de infraestrutura;
- ii) **Coleta de dados das ferramentas selecionadas:** foram coletadas informações detalhadas sobre cada ferramenta, incluindo suas características, funcionalidades e capacidades específicas relacionadas à análise ACV dos pavimentos;

- iii) **Análise das categorias e critérios:** dado que as ferramentas já forneciam as categorias e critérios, esta etapa envolveu a compilação de todas as informações mencionadas em cada ferramenta;
- iv) **Avaliação das pontuações dos critérios:** considerando que as ferramentas já definem as pontuações para os critérios, essa etapa envolveu a compilação e análise das pontuações atribuídas por cada ferramenta a seus respectivos critérios, incluindo seu impacto na avaliação global da ferramenta;
- v) **Reorganização dos critérios em categorias comuns:** os critérios foram reorganizados em categorias comuns às ferramentas, de modo que fosse possível compará-las entre si.
- vi) **Porcentagem dos critérios relacionados à ACV do pavimento:** foram examinados os critérios que impactavam diretamente no ACV do pavimento. Esses critérios foram somados para obter a porcentagem em relação à pontuação total, o que permitiu identificar o quanto este influenciava na obtenção da certificação.

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados nesta pesquisa refletem uma análise abrangente das ferramentas de classificação da ACV do pavimento, com foco nas áreas de impacto e critérios relevantes para a avaliação de sustentabilidade. Após a identificação das ferramentas mais pertinentes para o escopo da pesquisa, uma cuidadosa revisão da literatura e da compilação de informações provenientes de fontes acadêmicas, foi possível estabelecer uma base sólida para a compreensão das características e funcionalidades de cada ferramenta.

A análise comparativa realizada permitiu uma compreensão mais detalhada das contribuições individuais de cada ferramenta para a avaliação da ACV do pavimento. Ao calcular as porcentagens de cada área de impacto em relação ao total, foi possível identificar padrões e tendências significativas, destacando áreas de maior e menor ênfase em cada ferramenta.

Esses resultados fornecem uma base sólida para discussões sobre a eficácia e relevância das ferramentas de classificação de sustentabilidade de ciclo de vida de

pavimentos, bem como informações para o desenvolvimento futuro dessas ferramentas.

Nos itens abaixo serão discutidas e exploradas as implicações dos resultados obtidos, com o objetivo de selecionar a ferramenta mais adequada para a avaliação da sustentabilidade na ACV do pavimento e suas possíveis aplicações.

4.1 GREEN GUIDE FOR ROADS

O *Green Guide for Roads* é uma ferramenta desenvolvida para avaliar e classificar a sustentabilidade de pavimentos rodoviários. Foi criada em 2008 pela *Stantec Consulting* e seu objetivo principal é fornecer orientações e critérios para a concepção, construção e manutenção de estradas de forma ambientalmente responsável (Clark *et al.*, 2009).

Uma das principais vantagens do *Green Guide for Roads* é sua capacidade de fornecer orientações práticas e específicas para melhorar a sustentabilidade de projetos rodoviários. Ele permite que planejadores, engenheiros e tomadores de decisão considerem ativamente os aspectos ambientais, sociais e econômicos ao projetar e construir estradas, contribuindo assim para a redução do impacto ambiental e a promoção do desenvolvimento sustentável no setor de infraestrutura viária.

Como pode ser observado no Quadro 2, a ferramenta utiliza uma abordagem baseada em critérios de desempenho e atribui pontuações para diferentes aspectos, permitindo uma análise comparativa entre as opções disponíveis. Originalmente o guia é dividido em sete categorias: mobilidade para todos; eficiência no transporte; segurança; energia e atmosfera; materiais e recursos; impacto na comunidade; e inovação no processo de projeto.

Quadro 2 - Categorias e critérios do *Green Guide for Roads*.

CATEGORIA	ID DO CRITÉRIO	CRITÉRIO	PONTOS
Mobilidade	MFA-1	Gerenciamento de estacionamento	2
	MFA-2	Instalações de trânsito	3
	MFA-3	Ciclovias/Passeios	3
	MFA-4	Estacionamento de bicicletas	1
	MFA-5	Projeto de instalações para bicicletas	3

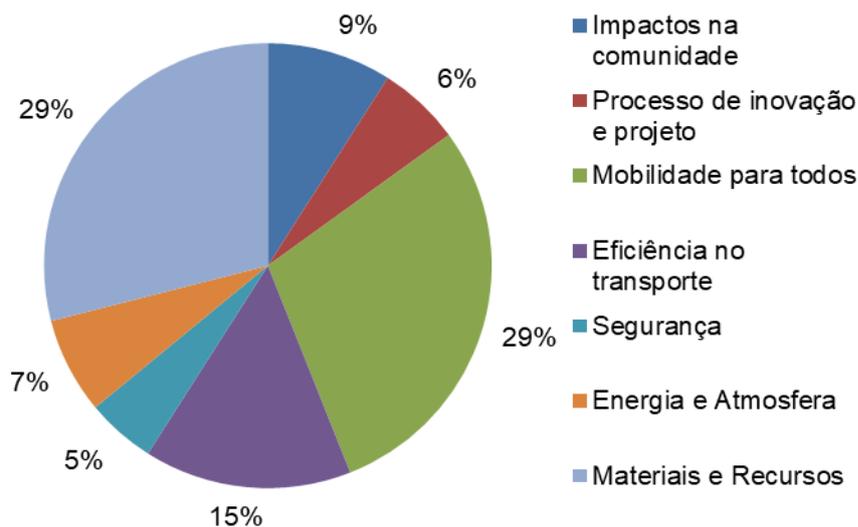
	MFA-6	Passeios para pedestres/calçadas	5
	MFA-7	Projeto de instalações para pedestres	7
Eficiência no transporte	TE-1	Nível de serviço ideal	4
	TE-2	Sinais de trânsito responsivos	4
	TE-3	Plano de manutenção de tráfego	4
Segurança	SF-1	Velocidade do projeto	1
	SF-2	Consistência na velocidade do projeto	1
	SF-3	Separação de modos	1
	SF-4	Pontos de conflito	1
Energia e atmosfera	EA-1	Eficiência energética das infraestruturas	2
	EA-2	Gestão sustentável de canteiro de obras	2
	EA-3	Materiais locais	2
Material e recursos	MR-1	Pegada de carbono no canteiro de obras	2
	MR-2	Gestão de resíduos de construção	2
	MR-3	Conteúdo reciclado	10
	MR-4	Pavimentos de longa duração	4
	MR-5	Gerenciamento de águas pluviais	5
	MR-6	Paisagismo com eficiência hídrica	1
Impactos na comunidade	CI-1	Ruído	3
	CI-2	Poluição luminosa	1
	CI-3	Elementos visuais	3
Processo de inovação e projeto	ID-1	Inovação e desempenho exemplar	5
Total de pontos			82

Fonte: Texto adaptado de OZTURK (2019).

Só é possível ser premiado com a certificação se cumprir pelo menos 40% dos créditos. Se um projeto alcançar 50% ou mais, será concedido o prêmio *silver*; para 60% ou mais, o prêmio será *gold*; e para 80% ou mais, será *platinum*. O guia não especifica se a avaliação deve ser realizada por meio de autoavaliação ou se a verificação por terceiros é necessária para validar as pontuações.

As principais áreas de impacto dessa ferramenta são os itens de “materiais e recursos” e “mobilidade para todos”, ambos com a porcentagem de 29%, enquanto as outras cinco categorias tem uma média inferior a 20%, esses resultados podem ser observados na Figura 5.

Figura 5 - Porcentagem das categorias do *Green Guide for Roads*.



Fonte: Autor (2024).

Com isso, vê-se o destaque aos âmbitos ambiental e social, pois na categoria de “materiais e recursos” destina-se a análise de questões como a gestão de resíduos de construção, o conteúdo reciclado, gerenciamento de águas pluviais e paisagismo com eficiência hídrica.

No âmbito social, a ferramenta se destaca pela “mobilidade” ser a modalidade que mais possui critérios de análise, sendo 7 critérios que avaliam desde o gerenciamento de estacionamento, instalações de trânsito, ciclovias/passeios ao projeto de instalações para pedestres. A ferramenta também demonstra ser útil a todos os tipos de estradas (urbanas e rurais), ao debater conceitos de acessibilidade universal, equidade entre os meios de transporte, compatibilidade e habitabilidade, conservação de recursos e proteção ambiental.

O item avaliado com menor percentual, 5%, refere-se ao item da “segurança” que detalha os seguintes critérios: velocidade do projeto, consistência na velocidade do projeto, separação de modos, pontos de conflito. A defasagem nessa coleta de dados contribui para criar lacunas acerca do tempo hábil de implementação, custo, e inconsistência entre processos, pontos que poderiam apontar questionamentos pertinentes aos seus usuários.

4.2 GREENLITES

É um programa de auto certificação que distingue projetos e operações de transporte com base na medida em que incorporam escolhas sustentáveis. Este é principalmente um programa de gestão interna do NYSDOT – *New York State Department of Transportation*, que é o departamento de transportes do Estado de Nova Iorque, para medir o desempenho, reconhecer boas práticas e identificar onde é preciso melhorar em projetos rodoviários do estado. Também fornece ao departamento uma forma de demonstrar ao público como está o avanço nas práticas sustentáveis.

Os projetos e operações do projeto NYSDOT são avaliados quanto a práticas sustentáveis e, com base no total de créditos recebidos, é atribuído um nível de certificação apropriado, como demonstrado no Quadro 3. O sistema de classificação reconhece vários níveis de certificação, com o nível mais alto destinado a projetos e grupos operacionais que melhoram claramente o estado das soluções de transporte sustentável (Amorim, 2019).

Quadro 3 - Categorias e critérios do *GreenLITES*.

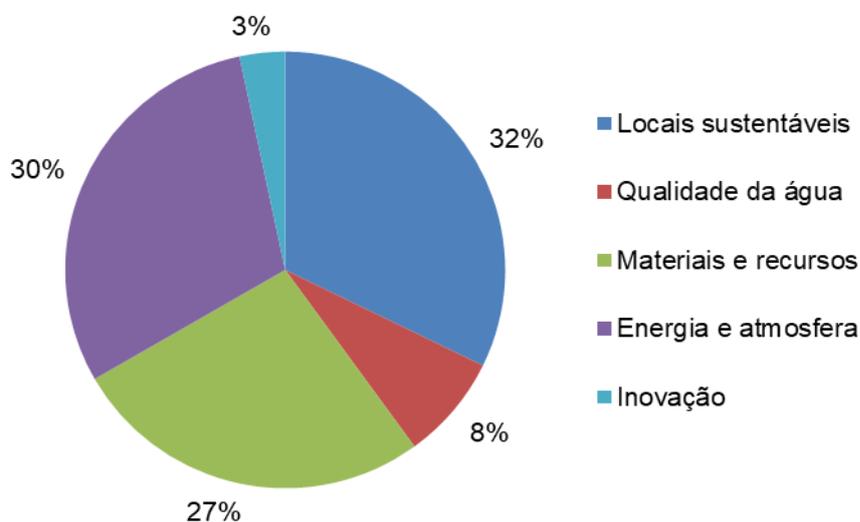
CATEGORIA	ID DO CRITÉRIO	CRITÉRIO	PONTOS
Locais Sustentáveis	S-1	Seleção de alinhamento	13
	S-2	Soluções sensíveis ao contexto	15
	S-3	Uso de terra/planejamento comunitário	20
	S-4	Proteger, aprimorar ou restaurar o habitat da vida selvagem	19
	S-5	Proteger, plantar ou mitigar a remoção de árvores	14
Qualidade da água	W-1	Gerenciamento de águas pluviais (volume e qualidade)	10
	W-2	Práticas recomendadas de gerenciamento	10
Materiais e recursos	M-1	Reutilização de materiais	32
	M-2	Conteúdo reciclado	16
	M-3	Material fornecido localmente	4
	M-4	Técnicas de bioengenharia	8
	M-5	Minimização de materiais perigosos	6
Energia e atmosfera	E-1	Melhorar o fluxo de tráfego	29
	E-2	Reduzir o consumo de energia elétrica	10

	E-3	Reduzir o consumo de petróleo	15
	E-4	Melhorar as instalações para bicicletas e pedestres	35
	E-5	Redução de ruído	12
	E-6	Redução de luz difusa	3
Inovação	I-1	Inovação	4
	I-2	Não listado	2
	I-3	Manual de projeto de ruas de Nova Iorque	1
Total de pontos			278

Fonte: Texto adaptado de OZTURK (2019).

Como demonstrado na Figura 6, “locais sustentáveis” com 29% é a categoria que lidera a análise da ferramenta *GreenLITES*. Este envolve critérios como proteção a vida selvagem e atenuação a remoção de árvores que estão alinhados com um dos pilares descritos pelo programa, no qual, visa incentivar a incorporação de práticas de planejamento que promovam comunidades mais habitáveis e vibrantes e, ao mesmo tempo, preservem o ambiente.

Figura 6 - Porcentagem das categorias do *GreenLITES*.



Fonte: Autor (2024).

Apesar da ferramenta se definir como um produto usado de forma contínua para classificar formalmente projetos, trabalhos de operações, (feitos em um ciclo anual) para revisão interna e comparação, a análise demonstra que a característica de facilitador no processo de expansão/uso de alternativas inovadoras, que podem

contribuir para melhorar a sustentabilidade do transporte, não é considerada como relevante na análise quando percebido o percentual que a inovação participa na certificação: 3%.

Seu sistema de pontos também reforça a necessidade de demonstrar ao público os avanços nas práticas sustentáveis, visto que cada categoria fornece um certificado. Além desta interação, há a opção de usar a ferramenta como um mecanismo de envio para revisarem e avaliarem a sustentabilidade de um projeto de transporte proposto. Existem quatro níveis de prêmios: “certificado” (15-29 pontos); “prata” (30-44 pontos); “ouro” (45-59 pontos); “*evergreen*” (60+ pontos). Os níveis de desempenho foram inicialmente definidos usando uma distribuição estatística.

4.3 GREENROADS

É um sistema de classificação de sustentabilidade, ou "métrica de desempenho", acessível ao público em geral, destinado ao planejamento e construção de rodovias, podendo ser utilizado por qualquer pessoa. Ele concede pontos para escolhas/práticas sustentáveis e pode ser usado para avaliar a sustentabilidade de projetos rodoviários. As “*Greenroads*” começaram no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Washington em 2007 e originalmente, era a dissertação de mestrado de Martina Soderlund na área de construção/transporte do departamento (*University of Washigton, 2010*).

O *Greenroads* busca identificar e premiar projetos rodoviários que ultrapassem as expectativas públicas em termos de desempenho ambiental, econômico e social. Essencialmente, a ferramenta auxilia na quantificação dos atributos sustentáveis de um projeto rodoviário. Essa quantificação pode ser utilizada para:

- i) Identificar os recursos que contribuem para a sustentabilidade do projeto;
- ii) Estabelecer responsabilidade pela sustentabilidade em projetos rodoviários;
- iii) Monitorar e avaliar metas específicas de sustentabilidade ao longo do tempo;
- iv) Gerenciar e aprimorar a sustentabilidade das estradas;

- v) Estimular práticas novas e inovadoras;
- vi) Promover vantagens competitivas e outros incentivos econômicos ou de mercado para a sustentabilidade;
- vii) Comunicar características sustentáveis para as partes interessadas de forma compreensível, especialmente para o público em geral.

Leva em consideração como o sistema da rodovia funciona, o ciclo de desenvolvimento da rodovia nos anos seguintes e como o pavimento rodoviário se adequa à métrica de desempenho sustentável. Este sistema atribui pontos para as práticas sustentáveis, tanto em relação à elaboração do projeto quanto à execução, e que podem ser usados para certificação com base no valor total de pontos obtidos.

Existem quatro níveis de certificação, sendo o bronze se o projeto atingir pontuação de 32 a 42 pontos, a prata para pontuações entre 43 e 53, o ouro para pontuações entre 54 e 63, e o *evergreen* para pontuações de 64 pontos ou mais.

A avaliação é feita baseada no cumprimento de “requisitos de projeto”, que são 11 ao todo e não geram pontuação, mas são de caráter eliminatório, ou seja, devem ser obrigatoriamente cumpridos para a sequência da avaliação. Além disso, há os “créditos voluntários”, que são 37 na versão original do programa e geram pontuação. Assim como os chamados “créditos personalizados”, que podem ser sugeridos à equipe do *Greenroads* para avaliação. Esses requisitos são demonstrados nos Quadro 4 e Quadro 5.

Quadro 4 - Requisitos do projeto do *Greenroads*.

REQUISITOS
Processo de revisão ambiental
Análise do custo do ciclo de vida
Registo do ciclo de vida
Plano de controle de qualidade
Plano de mitigação do ruído
Plano de gestão de resíduos
Plano de prevenção da poluição
Desenvolvimento de baixo Impacto
Sistema de gestão de pavimentos
Plano de manutenção do local
Divulgação educacional

Fonte: Texto adaptado de MUENCH (2010).

Quadro 5 - Créditos voluntários do *Greenroads*.

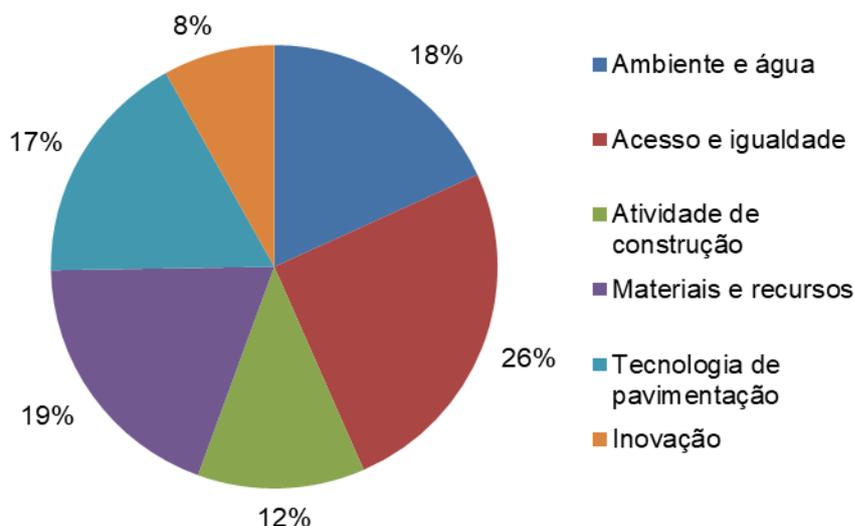
CATEGORIA	ID DO CRITÉRIO	CRÉDITOS	PONTOS
Meio ambiente e água	EW-1	Sistema de gestão ambiental	2
	EW-2	Controlo do fluxo de escoamento	3
	EW-3	Qualidade do escoamento	3
	EW-4	Análise de custos da drenagem	1
	EW-5	Vegetação do local	3
	EW-6	Restauração de habitat	3
	EW-7	Conectividade ecológica	3
	EW-8	Poluição luminosa	3
Acesso e igualdade	AE-1	Auditoria de segurança	2
	AE-2	Sistemas de transporte inteligentes	5
	AE-3	Soluções sensíveis ao contexto	5
	AE-4	Redução das emissões de tráfego	5
	AE-5	Acesso para pedestres	2
	AE-6	Acesso de bicicletas	2
	AE-7	Trânsito e acessibilidade	5
	AE-8	Paisagens	2
	AE-9	Divulgação cultural	2
Atividade de construção	CA-1	Gestão de processos de qualidade	2
	CA-2	Formação ambiental	1
	CA-3	Plano de reciclagem do local	1
	CA-4	Redução de combustíveis fósseis	2

	CA-5	Redução das emissões de equipamentos	2
	CA-6	Redução de emissões de pavimentação	1
	CA-7	Monitorização do uso da água	2
	CA-8	Garantia do construtor	3
Materiais e recursos	MR-1	Avaliação do ciclo de vida	2
	MR-2	Reutilização de pavimentos	5
	MR-3	Equilíbrio de terraplenagem	1
	MR-4	Materiais reciclados	5
	MR-5	Materiais regionais	5
	MR-6	Eficiência energética	5
Tecnologia de pavimentação	PT-1	Pavimento de longa duração	5
	PT-2	Pavimento permeável	3
	PT-3	Mistura de asfalto quente	3
	PT-4	Pavimento frio	5
	PT-5	Pavimento silencioso	3
	PT-6	Monitorização do desempenho do pavimento	1
Inovação	CC-1	Critério customizado	10
		Total de pontos	118

Fonte: Texto adaptado de MUENCH (2010).

Como pode ser verificado na Figura 7, a categoria com maior área de impacto, representando 25%, é "acesso à igualdade", que está inserida no pilar social e avalia a realização de auditorias de segurança rodoviária, implementação de soluções de sistemas de transporte inteligentes, melhoria na acessibilidade dos pedestres e das bicicletas, proporciona vistas de paisagens e arte/cultura/valores comunitários na estrada.

Figura 7 - Porcentagem das categorias do *Greenroads*.



Fonte: Autor (2024).

4.4 I-LAST

O Guia de Transporte Sustentável e Habitável de Illinois (*I-LAST*) é um sistema de métricas de desempenho de sustentabilidade criado pelo grupo de sustentabilidade do *Illinois Department of Transportation* (IDOT), em colaboração com o *American Council of Engineering Companies* (ACEC) e a *Illinois Road and Transportation Builders Association* (IRTBA). Essa ferramenta estabelece um sistema de pontuação para planejamento, projeto e construção para preservar os recursos naturais e incentivar formas de transporte de baixo impacto.

O guia *I-LAST* consiste em mais de 150 possíveis práticas sustentáveis ou habitáveis que podem ser incluídas em projetos rodoviários. Essas práticas estão agrupadas em 17 seções e 8 categorias gerais que podem ser observadas no Quadro 6. Incluem atividades da fase de design, como o uso de práticas de soluções sensíveis ao contexto; decisões de projeto, como alinhamentos para evitar áreas ambientalmente sensíveis ou inclusão de instalações de trânsito; e especificações de construção, como permitir a reutilização de materiais recuperados.

Quadro 6 - Categorias e critérios do *I-LAST*.

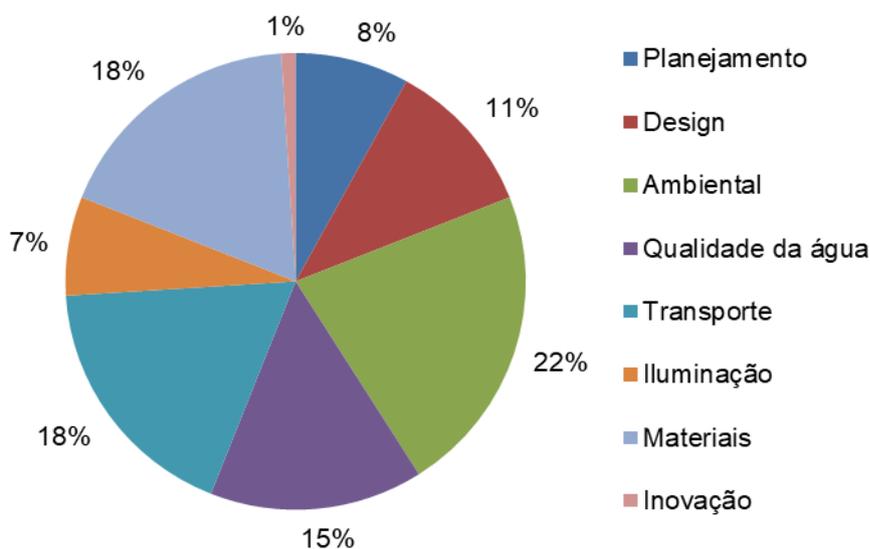
CATEGORIA	ID DO CRITÉRIO	CRÉDITOS	PONTOS
Planejamento	P-1	Soluções sensíveis ao contexto	8

	P-2	Uso da terra/planejamento comunitário	11
Projeto	D-1	Seleção de alinhamento	17
	D-2	Projeto sensível ao contexto	10
Ambiental	E-1	Proteger, aprimorar ou restaurar comunidades de vida selvagem	20
	E-2	Proteger, aprimorar e restaurar comunidades de plantas nativas	21
	E-3	Redução de ruído	10
Qualidade da água	W-1	Reduzir a área impermeável	10
	W-2	Tratamento de águas pluviais	15
	W-3	Práticas de projeto para proteger a qualidade da água	11
Transporte	T-1	Operações de tráfego	12
	T-2	Trânsito	10
	T-3	Melhorar as instalações para bicicletas e pedestres	20
Iluminação	L-1	Redução do consumo de energia elétrica	12
	L-2	Redução de luz difusa	4
Materiais	M-1	Materiais	43
Inovação	I-1	Inovação	3
Total de pontos			237

Fonte: Texto adaptado de OZTURK (2019).

Na Figura 8 é possível observar que o maior percentual de impacto é o “ambiental” com 22%, seguido de “transporte e iluminação” com 18%, porém “planejamento” e “design”, com respectivamente, 8% e 11% possuem critérios complementares que poderiam facilmente estar agrupados, como podemos ver em outras ferramentas, tendo assim a maior influência na certificação.

Figura 8 - Porcentagem das categorias do *I-LAST*.



Fonte: Autor (2024).

4.5 GREENPAVE

Um sistema de classificação simplificado baseado no *LEED - Leadership in Energy and Environmental Design*, que é ferramenta de certificação que tem como objetivo incentivar e agilizar a adoção de práticas relacionadas à construção sustentável, e no *GreenRoads*, mas personalizado para a região de Ontário (Canadá), com ênfase nos componentes do pavimento. Uma ferramenta para aumentar a conscientização sobre tecnologias e processos sustentáveis. O objetivo é melhorar a sustentabilidade da infraestrutura de transportes de Ontário através da concepção e seleção de alternativas de tratamento do pavimento.

O *GreenPave* é composto por dois componentes:

- i) Concepção: Fornecer orientação aos projetistas para selecionar alternativas "verdes" de pavimento;
- ii) Construção: Incentivar os empreiteiros a incorporarem práticas "verdes".

O Quadro 7 demonstra as categorias e critérios dessa ferramenta.

Quadro 7 - Categorias e critérios do *GreenPave*.

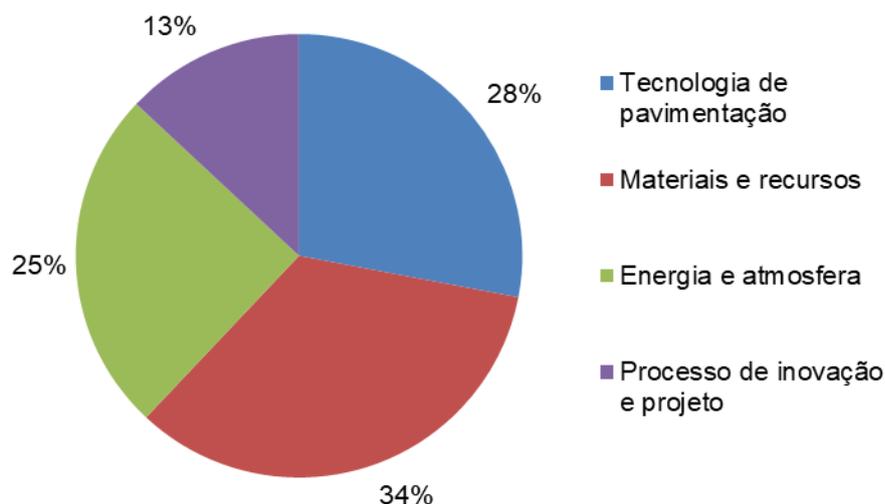
CATEGORIA	ID DO CRITÉRIO	CRÉDITOS	PONTOS
Tecnologias de pavimentação	PT-1	Pavimento longa duração	3
	PT-2	Pavimentos permeáveis	2
	PT-3	Mitigação de ruído	2
	PT-4	Pavimentos Frios	2
Materiais e recursos	MR-1	Conteúdo Reciclável	5
	MR-2	Estrutura do pavimento não perturbada	2
	MR-3	Materiais locais	2
	MR-4	Qualidade de construção	2
Energia e atmosfera	EA-1	Reduzir o consumo de energia	3
	EA-2	Redução de emissões de GEE	3
	EA-3	Suavidade do pavimento	1
	EA-4	Redução da poluição	1
Processo de inovação e projeto	I-1	Inovação e projeto	2
	I-2	Processo exemplar	2
Total de pontos			32

Fonte: Texto adaptado de OZTURK (2019).

Dos 14 critérios avaliados, 12 se destacam quando se trata da avaliação do ciclo de vida do pavimento, tornando evidente a relevância desta ferramenta para este tipo de atividade. Na análise comparativa, atingiu percentual de 88% de compatibilidade.

Como ilustrado na Figura 9, a categoria com menor percentual, inovação 13%, dentro de sua área de impacto não tem um desempenho expressivo. Entretanto, quando comparada às outras ferramentas, só perde para *I-last* com uma diferença mínima de 2%. Isso é um fator a se considerar na análise, pois um dos indicadores da avaliação do ciclo de vida é o "pensamento a longo prazo", e para que isso seja possível é necessário estudos e avanços constantes na tecnologia.

Figura 9 - Porcentagem das categorias do *GreenPave*.



Fonte: Autor (2024).

4.6 ANÁLISES COMPARATIVAS

Apesar das diferentes nomenclaturas, as ferramentas de classificação selecionadas possuem critérios que abrangem as mesmas áreas de impacto. Para viabilizar a comparação entre elas, os critérios foram reorganizados em categorias comuns a todas as ferramentas, sendo essas: projeto geométrico, mobilidade, operações de transporte, impactos na comunidade, energia e atmosfera, materiais e recursos, tecnologia de pavimentação, atividades de construção e inovação.

4.6.1 Projeto geométrico

Nesta categoria, foram avaliados critérios relacionados ao projeto geométrico da estrada. No Quadro 8, é possível observar que as ferramentas *GreenLITES*, *Greenroads* e *I-LAST* compartilham o critério "soluções sensíveis ao contexto", sendo este o único critério dessa categoria na ferramenta *Greenroads*. É possível notar que a ferramenta *Green Guide for Roads* detalha melhor critérios relacionados ao projeto geométrico, em relação às outras ferramentas analisadas.

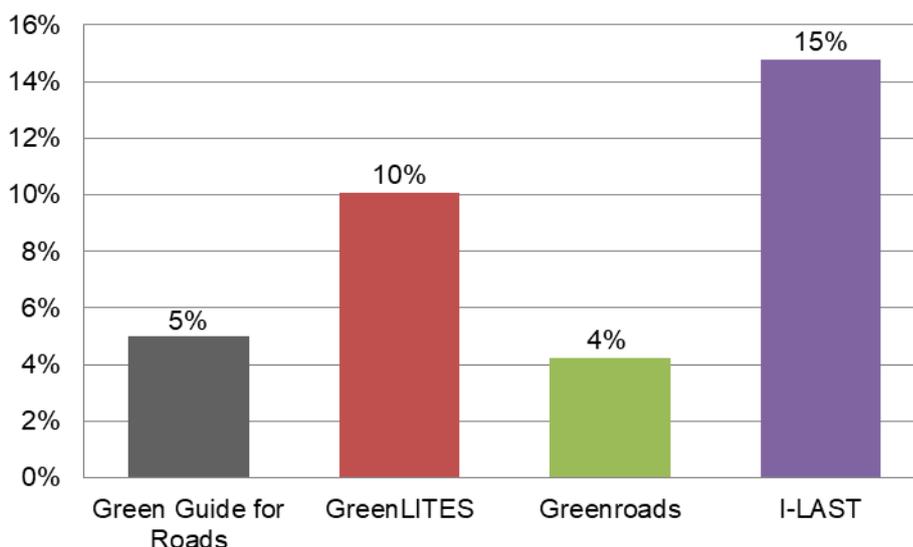
Quadro 8 - Critérios relacionados ao projeto geométrico.

FERRAMENTAS	CRITÉRIO
Green Guide for Roads	Velocidade do projeto
	Consistência na velocidade do projeto
	Separação de modos
	Pontos de conflito
GreenLITES	Seleção de alinhamento
	Soluções sensíveis ao contexto
Greenroads	Soluções sensíveis ao contexto
I-LAST	Soluções sensíveis ao contexto
	Seleção de alinhamento
	Projeto sensível ao contexto

Fonte: Autor (2024).

Embora o *Green Guide for Roads* inclua quatro critérios relacionados nessa categoria, sua influência é extremamente baixa, apenas 5%. Em contraste, a ferramenta *I-LAST*, que possui três critérios, a influência é três vezes maior, chegando a 15%. A Figura 10 ilustra esses resultados.

Figura 10 - Influência do projeto geométrico na avaliação.



Fonte: Autor (2024).

Fica evidente a falta de equilíbrio em relação à relevância dessa categoria nas diferentes ferramentas, já que apenas duas delas, *Green Guide for Roads* e

Greenroads, apresentam porcentagens próximas, 5% e 4%, respectivamente. Além disso, nenhum dos critérios da ferramenta *GreenPave* está incluído nessa categoria.

4.6.2 Mobilidade

O *Green Guide for Roads* considera um número significativo de critérios nessa categoria, todos voltados para melhorias em prol de pedestres ou ciclistas. Essa preocupação é comum nas demais ferramentas apresentadas no Quadro 9. No entanto, apenas a ferramenta *Greenroads* aborda outros tipos de mobilidade, incluindo o critério "trânsito e acessibilidade".

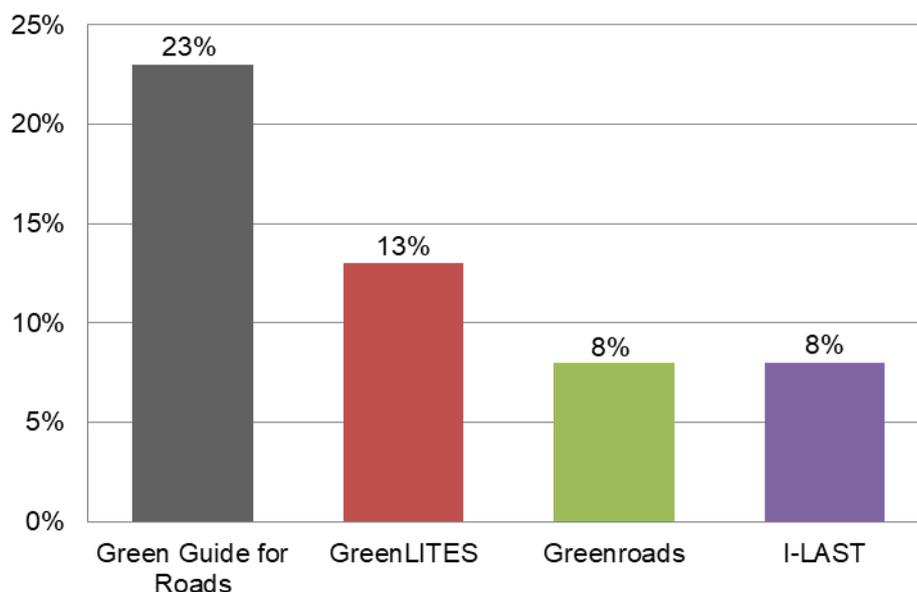
Quadro 9 - Critérios relacionados à mobilidade.

FERRAMENTAS	CRITÉRIO
Green Guide for Roads	Ciclovias/Passeios
	Estacionamento de bicicletas
	Projeto de instalações para bicicletas
	Passeios para pedestres/calçadas
	Projeto de instalações para pedestres
GreenLITES	Melhorar as instalações para bicicletas e pedestres
Greenroads	Acesso para pedestres
	Acesso de bicicletas
	Trânsito e acessibilidade
I-LAST	Melhorar as instalações para bicicletas e pedestres

Fonte: Autor (2024).

Há um equilíbrio em relação à mobilidade entre as ferramentas *Greenroads* e *I-LAST*, já que ambas apresentam a mesma porcentagem de influência, 8%. A *GreenLITES*, embora tenha uma pontuação ligeiramente maior, ainda mantém um equilíbrio com as duas ferramentas mencionadas anteriormente. Entretanto, a *Green Guide for Roads*, com uma influência de 23%, destaca-se como discrepante, evidenciando o quanto essa categoria impacta a certificação nesse sistema. Esses resultados são evidenciados na Figura 11.

Figura 11 - Influência da mobilidade na avaliação.



Fonte: Autor (2024).

A mobilidade da rodovia não impacta a certificação do sistema *GreenPave*, uma vez que nenhum dos critérios se relacionam diretamente com essa área de impacto, assim como na categoria anterior.

4.6.3 Operações de transporte

A categoria “operações de transporte” refere-se aos critérios relacionados à gestão e execução do transporte, como demonstrado no Quadro 10. Isso inclui planejamento de rotas, controle de tráfego, garantia da eficiência, segurança e conformidade do sistema.

Todas as ferramentas, exceto a *GreenPave*, possuem critérios diretamente relacionados a essas questões. De alguma forma, o tráfego é considerado em pelo menos um critério de cada uma dessas ferramentas.

Quadro 10 - Critérios relacionados às operações de transporte.

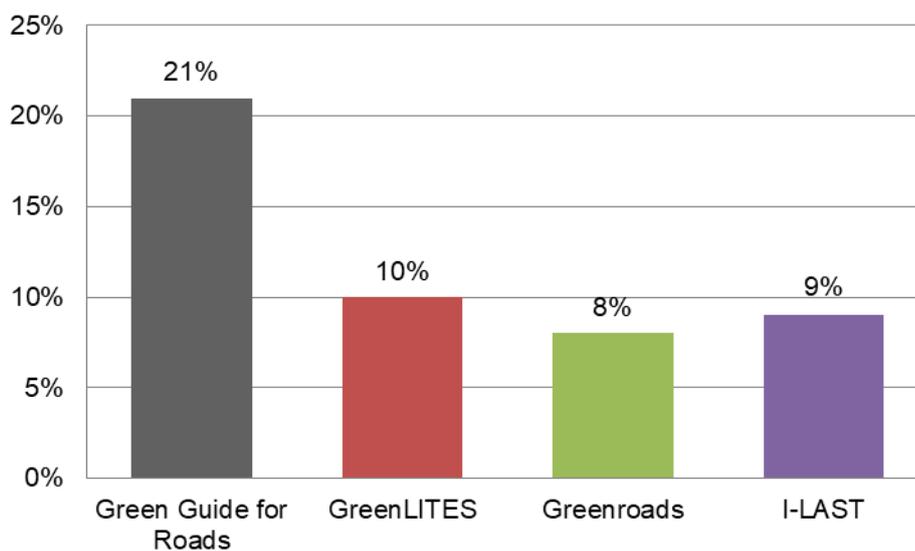
FERRAMENTAS	CRITÉRIO
Green Guide for Roads	Gerenciamento de estacionamento
	Instalações de trânsito
	Nível de serviço ideal
	Sinais de trânsito responsivos
	Plano de manutenção de tráfego

GreenLITES	Melhorar o fluxo de tráfego
Greenroads	Sistemas de transporte inteligentes
	Redução das emissões de tráfego
I-LAST	Operações de tráfego
	Trânsito

Fonte: Autor (2024).

De acordo com a Figura 12, assim como na categoria anterior, as ferramentas *GreenLITES*, *Greenroads* e *I-LAST* apresentam porcentagens equilibradas, de 10%, 8% e 9%, respectivamente. Já a *Green Guide for Roads* exibe uma porcentagem significativamente maior do que as demais. Quando somada à porcentagem da categoria anterior, essa ferramenta alcança quase 50% de sua influência no próprio sistema de transporte, levando em consideração meios alternativos de transporte, estacionamento e tráfego.

Figura 12 - Influência das operações de transporte na avaliação.



Fonte: Autor (2024).

4.6.4 Impactos na comunidade

Nesta categoria, são avaliados os critérios relacionados ao meio ambiente, à água e à comunidade em geral, incluindo aspectos como gerenciamento de águas pluviais, proteção à vegetação local e controle de poluição luminosa, como é possível observar no Quadro 11. Todas as ferramentas apresentam critérios nessa

categoria, e é importante ressaltar que todas demonstram uma preocupação com os ruídos gerados.

Quadro 11 - Critérios relacionados aos impactos na comunidade.

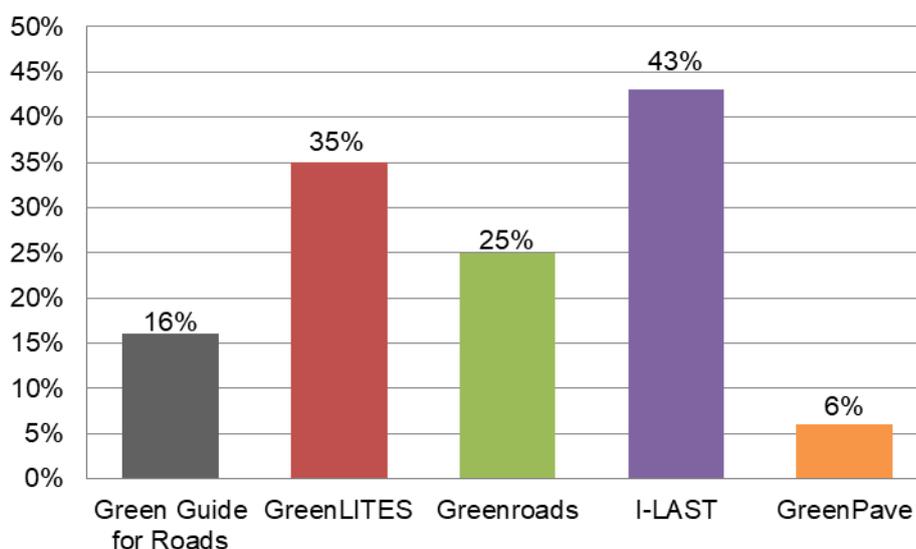
FERRAMENTAS	CRITÉRIO
Green Guide for Roads	Gerenciamento de águas pluviais
	Paisagismo com eficiência hídrica
	Ruído
	Poluição luminosa
	Elementos visuais
GreenLITES	Uso de terra/planejamento comunitário
	Proteger, aprimorar ou restaurar o habitat da vida selvagem
	Proteger, plantar ou mitigar a remoção de árvores
	Gerenciamento de águas pluviais (volume e qualidade)
	Práticas recomendadas de gerenciamento
	Reduzir o consumo de energia elétrica
	Redução de ruído
	Redução de luz difusa
Greenroads	Sistema de gestão ambiental
	Controlo do fluxo de escoamento
	Qualidade do escoamento
	Análise de custos das águas pluviais
	Vegetação do local
	Restauração de habitat
	Conectividade ecológica
	Poluição luminosa
	Paisagens cénicas
	Divulgação cultural
	Formação ambiental
	Monitorização do uso da água
	Equilíbrio de terraplenagem
I-LAST	Uso da terra/planejamento comunitário
	Proteger, aprimorar ou restaurar comunidades de vida selvagem
	Proteger, aprimorar e restaurar comunidades de plantas nativas
	Redução de ruído
	Redução de luz difusa
	Reduzir a área impermeável

	Tratamento de águas pluviais
	Práticas de projeto para proteger a qualidade da água
GreenPave	Mitigação de ruído

Fonte: Autor (2024).

Conforme ilustrado na Figura 13, apesar dessa categoria impactar todas as ferramentas, a influência é bastante desequilibrada. No *I-LAST*, os impactos na comunidade representam 43%, enquanto no *GreenPave*, esse valor é de apenas 6%. As outras ferramentas também apresentam porcentagens irregulares, o que impede uma avaliação precisa da importância dessa categoria para a certificação de forma geral.

Figura 13 - Influência dos impactos na comunidade na avaliação.



Fonte: Autor (2024).

4.6.5 Energia e atmosfera

Os critérios relacionados às emissões e à pegada de carbono estão incluídos nesta categoria e são de grande relevância para a sustentabilidade. Apenas uma ferramenta, *GreenLITES*, não apresenta critérios relacionados a esses aspectos, pois considera apenas a redução do consumo de petróleo na pontuação da categoria. Esses critérios são verificados no Quadro 12.

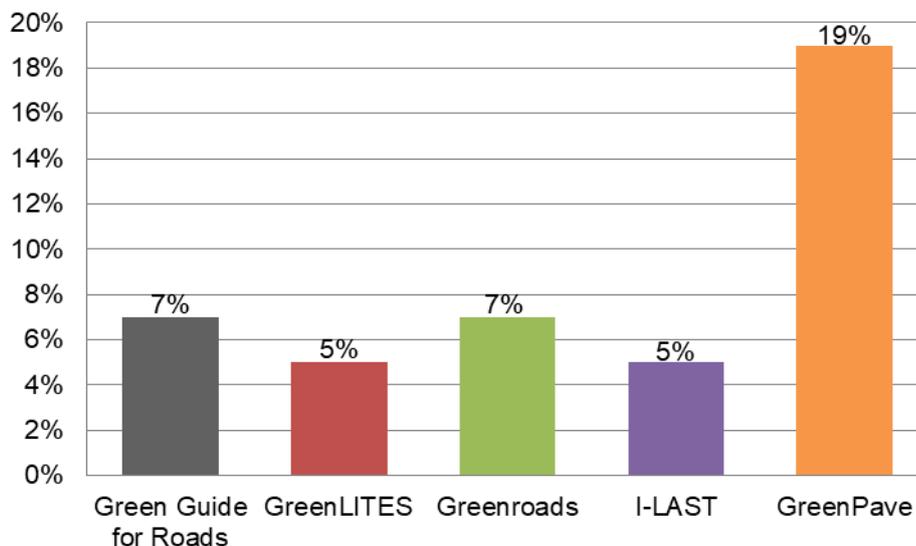
Quadro 12 - Critérios relacionados à energia e atmosfera

FERRAMENTAS	CRITÉRIO
Green Guide for Roads	Eficiência energética das infraestruturas
	Gestão sustentável no canteiro de obras
	Pegada carbono no canteiro de obras
GreenLITES	Reduzir o consumo de petróleo
Greenroads	Redução das emissões de equipamentos
	Redução de emissões de pavimentação
	Eficiência energética
I-LAST	Redução do consumo de energia elétrica
GreenPave	Reduzir o consumo de energia
	Redução de emissões de GEE

Fonte: Autor (2024).

As ferramentas *Green Guide for Roads*, *GreenLITES*, *Greenroads* e *I-LAST* apresentam uma influência consideravelmente baixa, mas equilibrada, variando entre 5% e 7%. Por outro lado, a *GreenPave*, embora possua apenas dois critérios, apresenta uma porcentagem significativamente alta, de 19%, destacando a importância atribuída pela ferramenta à redução das emissões de gases de efeito estufa e ao consumo de energia na avaliação da sustentabilidade. Esses dados são demonstrados na Figura 14.

Figura 14 - Influência da energia e atmosfera na avaliação.



Fonte: Autor (2024).

4.6.6 Materiais e recursos

Em “materiais e recursos”, todos os tópicos direcionam para o pavimento, sua estrutura, produção, reciclagem e qualidade. A importância da categoria ter uma boa área de impacto se dá, sobretudo, pelo desempenho de um pavimento rodoviário as exigências do tráfego e das condições climáticas ser determinado pelas propriedades dos materiais empregados nas várias camadas que o compõem.

É possível evidenciar que todas as ferramentas apresentam um grau de importância ao uso de materiais reciclados, uma vez que todas as ferramentas incluem esse aspecto como um critério em seus sistemas de avaliação. Observa-se no Quadro 13 esses critérios.

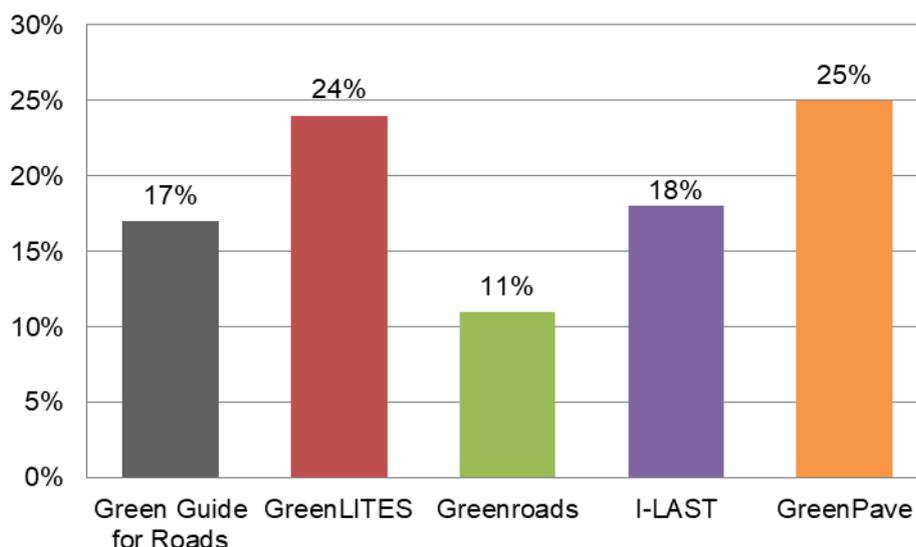
Quadro 13 - Critérios relacionados aos materiais e recursos.

FERRAMENTAS	CRITÉRIO
Green Guide for Roads	Materiais locais
	Gestão de resíduos de construção
	Conteúdo reciclado
GreenLITES	Reutilização de materiais
	Conteúdo reciclado
	Material fornecido localmente
	Técnicas de bioengenharia
	Minimização de materiais perigosos
Greenroads	Plano de reciclagem do local
	Redução de combustíveis fósseis
	Materiais reciclados
	Materiais regionais
I-LAST	Materiais
GreenPave	Conteúdo Reciclável
	Materiais locais
	Redução da poluição

Fonte: Autor (2024).

É possível observar na Figura 15, embora o *Greenroads* apresente uma porcentagem mais baixa, de 11%, essa é a categoria com o maior equilíbrio entre as ferramentas, evidenciando de forma igualitária a importância de considerar os materiais na avaliação da sustentabilidade.

Figura 15 - Influência dos materiais e recursos na avaliação.



Fonte: Autor (2024).

4.6.7 Tecnologia de pavimentação

Os critérios diretamente relacionados ao pavimento estão incluídos nesta categoria. Apesar de não ser levado em consideração por todas as ferramentas, é uma área de impacto com bastante relevância para a ACV para a análise da sustentabilidade, uma vez que abordam critérios como “pavimentos de longa duração”, “pavimentos frios” e “monitorização do desempenho do pavimento”. No Quadro 14 estão detalhados esses critérios.

Quadro 14 - Critérios relacionados à tecnologia de pavimentação.

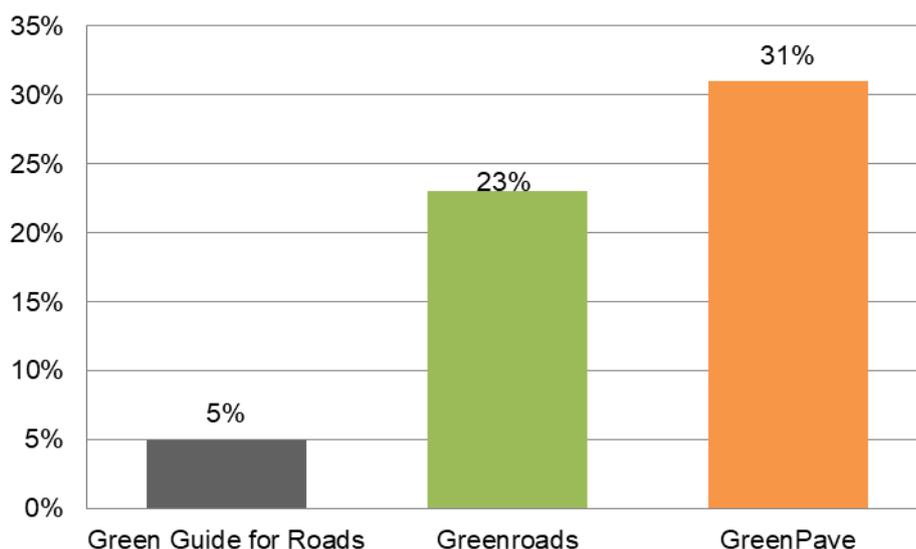
FERRAMENTAS	CRITÉRIO
Green Guide for Roads	Pavimentos de longa duração
Greenroads	Avaliação do ciclo de vida
	Reutilização de pavimentos
	Pavimento de longa duração
	Pavimento permeável
	Mistura de asfalto quente
	Pavimento frio
	Pavimento silencioso
Monitorização do desempenho do pavimento	
GreenPave	Pavimento longa duração
	Pavimentos permeáveis

	Pavimentos frios
	Estrutura do pavimento não perturbada

Fonte: Autor (2024).

Além da ausência dessa categoria em algumas ferramentas, as demais abordam o tema de maneira bastante irregular. De acordo com a Figura 16, o *Green Guide for Roads* tem uma influência de apenas 5%, enquanto o *GreenPave* atribui 31% a essa categoria, tornando-a a mais influente nesse sistema.

Figura 16 - Influência da tecnologia de pavimentação na avaliação.



Fonte: Autor (2024).

4.6.8 Atividades de construção

Conforme o Quadro 15, a categoria "atividades de construção" abrange critérios como auditoria de segurança, qualidade dos processos e garantia do construtor. No entanto, apenas 2 ferramentas consideram itens relacionados a esses aspectos como relevantes.

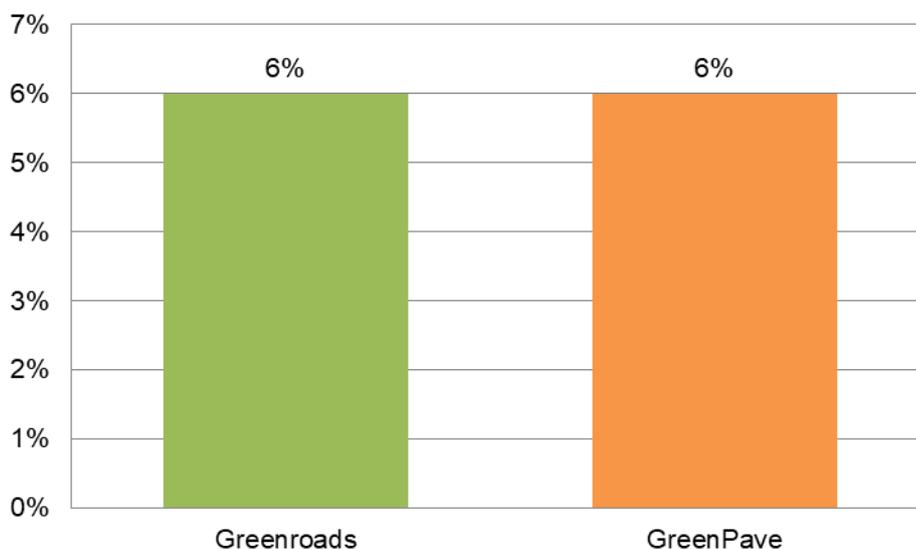
Quadro 15 - Critérios relacionados às atividades de construção.

FERRAMENTAS	CRITÉRIO
Greenroads	Auditoria de segurança
	Gestão de processos de qualidade
	Garantia do construtor
GreenPave	Qualidade de construção

Fonte: Autor (2024).

Por meio da Figura 17, é possível observar que além de poucas ferramentas incluírem essa categoria, sua influência é baixa, sendo apenas 6%. Isso levanta questões sobre a verdadeira importância desse tópico para a certificação.

Figura 17 - Influência das atividades de construção na avaliação.



Fonte: Autor (2024).

4.6.9 Inovação

Esta categoria tem como objetivo conceder pontos a projetos que se baseiam fortemente nos objetivos do programa ou que incorporam inovações notáveis em sustentabilidade, especialmente aquelas que não tenham sido utilizadas anteriormente, como é possível observar no Quadro 16.

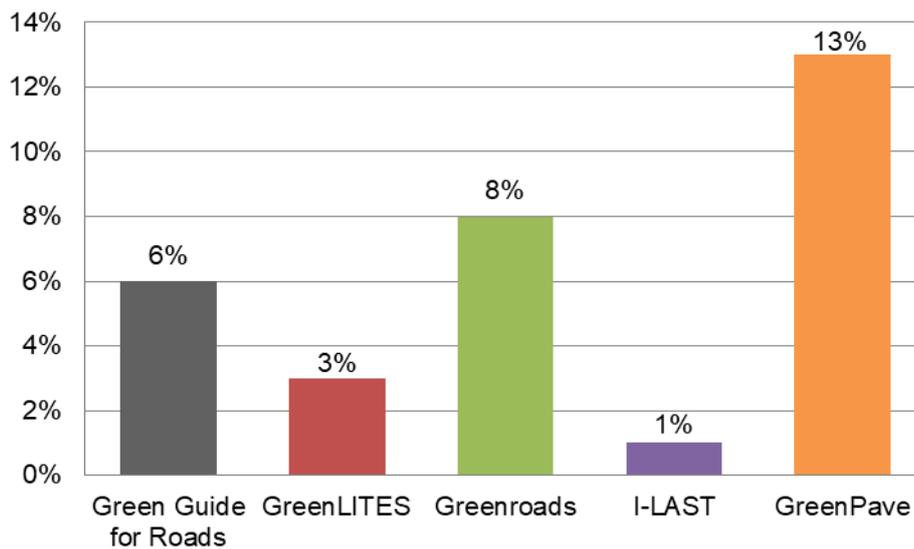
Quadro 16 - Critérios relacionados à inovação

FERRAMENTAS	CRITÉRIO
Green Guide for Roads	Inovação e desempenho exemplar
GreenLITES	Inovação
	Não listado
	Manual de projeto de ruas de Nova Iorque
Greenroads	Critério customizado
I-LAST	Inovação
GreenPave	Inovação e projeto
	Processo exemplar

Fonte: Autor (2024).

Embora todas as ferramentas considerem essa categoria, sua relevância é bastante variável, oscilando entre 1% e 13%, como ilustrado na Figura 18, o que torna as ferramentas bastante desequilibradas nesse aspecto. Mesmo que a *GreenLITES* inclua três critérios nessa categoria, ela influencia apenas 8% na certificação. Já a *GreenPave*, com apenas dois critérios, tem uma influência de 13%.

Figura 18 - Influência da inovação na avaliação.



Fonte: Autor (2024).

4.7 RELAÇÃO DAS FERRAMENTAS COM A ACV DO PAVIMENTO

As ferramentas realizam uma avaliação detalhada do ciclo de vida de todo o projeto, assegurando a reutilização de trechos de pavimento existentes e equilibrando as quantidades de corte e aterro, bem como o uso de materiais reciclados ou regionais. No entanto, foi necessário analisar quais critérios de cada ferramenta levam em conta a ACV do pavimento e qual é o impacto dessa consideração na certificação. O Quadro 17 apresenta os resultados dessa análise.

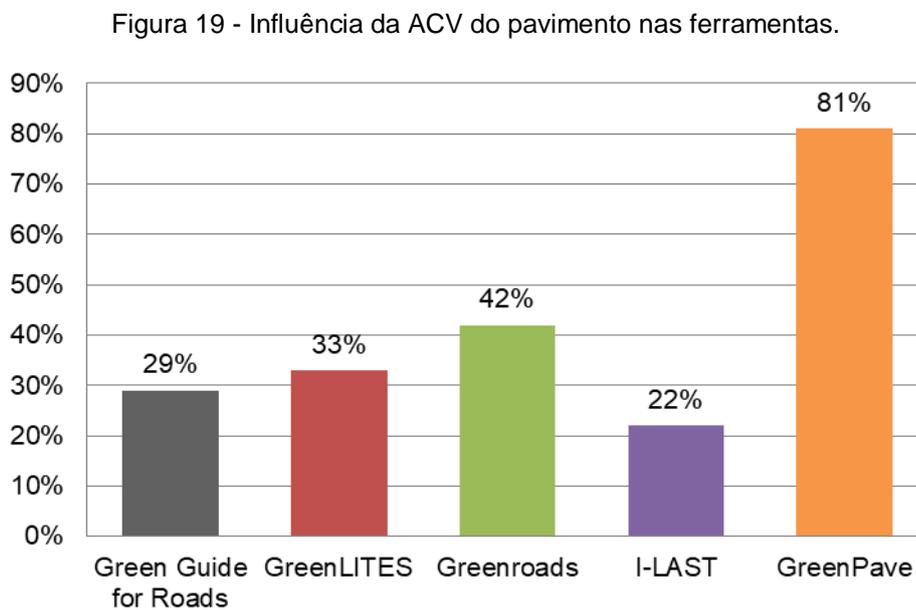
Quadro 17 - Critérios relacionados diretamente com a ACV do pavimento.

FERRAMENTAS	CRITÉRIO	PONTOS
Green Guide for Roads	Eficiência energética das infraestruturas	2
	Gestão sustentável de canteiro de obras	2
	Materiais locais	2
	Pegada carbono no canteiro de obras	2
	Gestão de resíduos de construção	2

	Conteúdo reciclado	10
	Pavimentos de longa duração	4
GreenLITES	Reutilização de materiais	32
	Conteúdo reciclado	16
	Material fornecido localmente	4
	Técnicas de bioengenharia	8
	Minimização de materiais perigosos	6
	Reduzir o consumo de energia elétrica	10
	Reduzir o consumo de petróleo	15
	Greenroads	Plano de reciclagem do local
Redução de combustíveis fósseis		2
Redução das emissões de equipamentos		2
Redução de emissões de pavimentação		1
Avaliação do ciclo de vida		2
Reutilização de pavimentos		5
Equilíbrio de terraplenagem		1
Materiais reciclados		5
Materiais regionais		5
Eficiência energética		5
Pavimento de longa duração		5
Pavimento permeável		3
Mistura de asfalto quente		3
Pavimento frio		5
Pavimento silencioso		3
Monitorização do desempenho do pavimento		1
I-LAST	Reduzir a área impermeável	10
	Materiais	43
GreenPave	Pavimentos de longa duração	3
	Pavimentos permeáveis	2
	Pavimentos frios	2
	Conteúdo reciclado	5
	Estrutura do pavimento não perturbada	2
	Materiais locais	2
	Qualidade de construção	2
	Reduzir o consumo de energia	3
	Redução de emissões de GEE	3
	Suavidade do pavimento	1
	Redução da poluição	1

Fonte: Autor (2024).

A ferramenta *Greenroads* apresentou 42% de compatibilidade com a ACV do pavimento. A *GreenLITES* registrou 33%, enquanto a *Green Guide for Roads* alcançou 29% e a *I-LAST* obteve 22%. A *GreenPave* destacou-se como a alternativa mais significativa, com uma compatibilidade de 81% como é possível observar na Figura 19.



Fonte: Autor (2024).

Como citado anteriormente, a *I-LAST* apresentou o menor grau de compatibilidade para ACV do pavimento, com apenas 22%. Tendo apenas dois itens destacados que teriam assertividade nessa avaliação, sendo eles: redução da área impermeável e análise dos materiais envolvidos no processo do projeto.

Apesar de possuir o menor quantitativo de pontos a ser atingido, o *Greenpave* toma vantagem por ser uma ferramenta específica para avaliação de pavimento, que apresenta questionamentos mais assertivos, em vez de categorias gerais que se repetem. Valida o uso de pavimentos específicos, facilitando este olhar cíclico de extração, produção, transporte e aplicação de materiais.

O *Greenpave*, portanto, se destaca por ser uma ferramenta que tem uma estrutura de avaliação estratégica. Dentro de um viés qualitativo, possui um desempenho mais eficaz por otimizar as respostas a serem dadas, visto que tópicos distantes da avaliação do ciclo do pavimento não são compilados no processo, diminuindo o tempo operacional de resposta e de cruzamento de informações.

5. CONCLUSÃO

As ferramentas de classificação de sustentabilidade citadas nesse trabalho têm o objetivo comum de avaliar e promover a sustentabilidade em projetos de infraestrutura e transporte. Foram encontradas 15 ferramentas inicialmente, porém apenas 5 foram selecionadas para análise, sendo essas *Green Guide for Roads*, *GreenLITES*, *Greenroads*, *I-LAST* e *GreenPave*.

Diante da análise das ferramentas de certificação, é evidente a variedade de critérios e categorias adotados por cada uma, refletindo abordagens distintas em relação à avaliação da sustentabilidade. Enquanto algumas ferramentas englobam todas as categorias, outras direcionam-se a critérios mais específicos. Observa-se que algumas ferramentas apresentam uma ampla gama de critérios, abordando diversas áreas de impacto, como é o caso do *Green Guide for Roads*. Por outro lado, há ferramentas, como o *GreenPave*, que adotam uma abordagem mais focada, concentrando-se principalmente nos critérios diretamente relacionados à tecnologia de pavimentação.

Essa variedade reflete-se na influência das categorias nas avaliações, com algumas ferramentas atribuindo maior peso a determinadas áreas de impacto do que outras. Por exemplo, a *Green Guide for Roads* destaca-se por sua ênfase na categoria de impactos na comunidade, enquanto o *GreenPave* prioriza critérios relacionados à tecnologia de pavimentação.

Essa análise revela a importância de considerar não apenas a quantidade, mas também a relevância dos critérios adotados por cada ferramenta. Além disso, ressalta a necessidade de uma abordagem estratégica na seleção da ferramenta de certificação mais adequada para cada contexto, levando em conta as especificidades do projeto e as áreas de impacto prioritárias. Nesse sentido, o *GreenPave* destaca-se como uma ferramenta especializada que oferece uma avaliação mais direcionada e eficiente, otimizando o processo de certificação e garantindo uma análise mais precisa da sustentabilidade na ACV pavimento.

REFERÊNCIAS

- A ONU e o meio ambiente.** Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91223-onu-e-o-meio-ambiente>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- ISO, ABNT NBR. 14040. Gestão ambiental–Avaliação do ciclo de vida–Princípios e estrutura. **Rio de Janeiro: ABNT, 2001.**
- ALMEIDA, Ana Sofia Coito. **Metodologias para dimensionamento do reforço de pavimentos rodoviários flexíveis.** 2016. Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior (Portugal).
- AMARAL, Paulo Otávio et al. Patologias em pavimentos flexíveis. **Revista GeTeC**, v. 10, n. 30, 2021.
- AMBIENTE BRASIL. **Desenvolvimento Sustentável.** Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/gestao/artigos/desenvolvimento_sustentavel.html. Acesso em: 17 jan. 2024.
- AMORIM, Denis Gerage. **Sustentabilidade urbana no planejamento de rodovia perimetral em região metropolitana.** 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração.** São Paulo, São Paulo, Editora Oficina de Textos, 2007.
- BARROS AZEVEDO, Diogo et al. RELAÇÃO ENTRE CRESCIMENTO ECONÔMICO E AQUECIMENTO GLOBAL: UMA PERSPECTIVA ECONÔMICA. **Revista Foco (Interdisciplinary Studies Journal)**, v. 16, n. 8, 2023.
- BATAILLE, Chris et al. The need for national deep decarbonization pathways for effective climate policy. **Climate Policy**, v. 16, n. sup1, p. S7-S26, 2016.
- BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros.** 3ª reimpressão – Rio de Janeiro: Petrobrás, 2008.
- BOWLES, Evan C. et al. Application of envision for enhanced evaluation of alternatives in wastewater utility capital improvement projects. In: **International Conference on Sustainable Infrastructure 2017.** 2017. p. 32-44.
- BRAGA, Kamylla et al. REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA (RSL): FERRAMENTAS PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NO CONTEXTO URBANO (USAT´S). **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 12, p. e20011-e20011, 2023.

BRAGA, Verônica Abadia Ribeiro; MAIA, Bruno Ismael Oliveira Cardoso; LOPES, Nadinne Pereira. **Patologias no pavimento urbano em função do tráfego de veículos pesados**. In: Congresso Interdisciplinar. ISSN: 2595-7732. 2017.

BRANCO, Fernando et al. **Pavimentos Rodoviários**. 1ª ed. Coimbra: Editora Almedina, 2006.

BRUNDTLAND, Gro Harlem; COMUM, Nosso Futuro. Relatório Brundtland. **Our Common Future: United Nations**, p. 540-542, 1987.

BUENO, Paola Carolina; MAGRO, José Manuel Vassallo; CHEUNG, Kevin. **Road infrastructure design for optimizing sustainability**. Universidad Politécnica de Madrid, Spain. 2013.

CAMARGO, Ana Luiza de Brasil. **As dimensões e os desafios do desenvolvimento sustentável: concepções, entraves e implicações à sociedade humana**. Florianópolis, 2002. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, 2002.

COMUM, Nosso Futuro. Comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento. **Rio de Janeiro: FGV**, 1991.

COSENTINO, L. T. **Sustentabilidade na Construção Civil: Proposta de diretrizes baseadas nos selos de certificação ambiental**. Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2017.

COSTA, Marcela da Silva. Mobilidade urbana sustentável: um estudo comparativo e as bases de um sistema de gestão para Brasil e Portugal. **EESC/USP. São Paulo**, 2003.

DEMARZO, Mauro Augusto; PORTO, Aline Lopes Gonçalves. Indicadores de sustentabilidade (LCA) e análise do ciclo de vida para madeira de reflorestamento na Construção Civil. **Revista Madeira Arquitetura & Engenharia**, v. 21, p. 17, 2007.

DNIT, **Manual de Drenagem de Rodovias**. 2ª Edição, Rio de Janeiro. 2006.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Life cycle assessment - A guide to approaches, experiences and information sources**. United Kingdom, 1997.

FERNANDES, Marcella. **81% dos brasileiros adotam hábitos sustentáveis, revela pesquisa da CNI**. Agencia de Notícias CNI. Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/81-dos-brasileiros-adotam-habitos-sustentaveis-revela-pesquisa-da-cni/>>. Acesso em: 20 fev. 2024.

FERREIRA, José Vicente Rodrigues; DE CHAGAS, Área de Doença. Gestão ambiental. **Análise do Ciclo de Vida**. Instituto Politécnico de Viseu, 2004.

FROUFE, Mariângela Monteiro; DE BRITO MELLO, Luiz Carlos Brasil; SOARES, Carlos Alberto Pereira. Indicadores de sustentabilidade em canteiros de obras, segundo o PBQP-h. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 10149-10163, 2020.

FURRAER, Igor Leonardo Loeblein; BERNARDY, Rógis Juarez; BERNARDY, Juliane Manfrin. Integração de Pequenos Municípios aos Objetivos De Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030. **Revista Gestão Organizacional**, v. 16, n. 3, p. 41-58, 2023.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GUIMARÃES, Leonam dos Santos. **A geopolítica da energia de baixo carbono**. Ed 2. Lisboa, 2016.

HORA, Karoline Matos da. **Metodologia para avaliação do ciclo de vida de ciclovias de pavimento rígido**. 2022.

HUNT, Robert G.; SELLERS, Jere D.; FRANKLIN, William E. Resource and environmental profile analysis: A life cycle environmental assessment for products and procedures. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 12, n. 3, p. 245-269, 1992.

I-LAST, I. D. O. T. Illinois-Livable and Sustainable Transportation Rating System and Guide. **Illinois Department of Transportation (IDOT): Springfield, IL, USA**, 2012.

IMPERATIVES, Strategic. Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future. **Accessed Feb**, v. 10, n. 42,427, 1987.

ITL, et al. **Pesquisa CNT de Rodovias**. Sistema Transporte .204p. Brasília, 2023.

JAPPUR, Rafael Feyh; FRANCISCON, Mariana. Indicadores de Sustentabilidade para uma Organização do Segmento da Construção Civil Pesada. **Mix sustentável**, v. 4, n. 3, p. 97-102, 2018.

KENDALL, A. Life Cycle Assessment for Pavement: Introduction. In: **Presentation in Minutes, FHWA Sustainable Pavement Technical Working Group Meeting**. 2012. p. 145-156.

KLOPFER, Walter. Life cycle sustainability assessment of products: (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, p. 89-95, 2008.

KRAU, Marcela Maria Toscano et al. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) na pavimentação asfáltica: Uma revisão sistemática da literatura**. 2021.

KULAY, Luiz Alexandre; SEO, Emilia Satoshi Miyamaru. Orientações conceituais para elaboração de inventários de ciclo de vida. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente–INTERFACHES–2006**, 2010.

KUTER, D. et al. **Eighteen-month interim analysis of efficacy and safety of givosiran, an RNAi therapeutic for acute hepatic porphyria, in the ENVISION open label extension**. Hematology, Transfusion and Cell Therapy, v. 43, p. S5-S6, 2021.

MAIA, Iva Marlene Cardoso. **Caracterização de patologias em pavimentos rodoviários**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal).

MARTINE, George; ALVES, José Eustáquio Diniz. Economia, sociedade e meio ambiente no século 21: tripé ou trilema da sustentabilidade?. **Revista brasileira de estudos de população**, v. 32, p. 433-460, 2015.

DE SOUZA, Lucian Maschio et al. Proposal of a Hesitant Fuzzy Linguistic TOPSIS model for Supplier Sustainability Evaluation. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. e04474-e04474, 2024.

MATIAS, Rubens Feitosa. **Revisão bibliográfica sobre pavimento rígido e pavimento flexível considerando dimensionamento e custos**. 2022.

MEDEIROS, Larissa Mendes; DURANTE, Luciane Cleonice; CALLEJAS, Ivan Júlio Apolonio. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, v. 18, p. 365-385, 2018.

MELLO, Luiz Guilherme Rodrigues et al. Análise do impacto do período de projeto de pavimentos no custo global de obras rodoviárias. **Transportes**, v. 24, n. 4, p. 64-74, 2016.

MENDES, Natalia Crespo; BUENO, Cristiane; OMETTO, Aldo Roberto. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, p. 160-175, 2015.

MENDONÇA FILHO, José Moacir de; ROCHA, Eider Gomes de Azevedo. Estudo Comparativo entre Pavimentos Flexível e Rígido na pavimentação rodoviária. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano**, v. 3, n. 6, p. 2, 2018.

MINUSCULLI, Patrick Renan; REIS, AMF. Indicadores de sustentabilidade nas edificações concluídas em 2020 na cidade de concórdia. **Concórdia SC: ENBRAPA/UnC**, 2020.

MOREIRA, Danilo Leite. Uma breve abordagem histórica do desenvolvimento do rodoviarismo e do transporte rodoviário de cargas no Brasil. **Faces da História**, v. 10, n. 1, p. 155-174, 2023.

MOURA, Luiz Antônio Abdalla de. **Qualidade e gestão ambiental: sugestões para implantação das normas ISO 14000 nas empresas**. 2. ed. São Paulo: Juarez de Oliveira, 2000.

MUENCH, Stephen T.; ANDERSON, Jeralee; BEVAN, Tim. Greenroads: A sustainability rating system for roadways. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 3, n. 5, p. 270-279, 2010.

MUNHOZ, Eduardo Antonio Pires. Sustentabilidade na Gestão Estratégica das Indústrias. **Conhecimento Interativo**, v. 14, n. 1, p. 14-27, 2020.

NETTO, Marcelo Ramos. **Estudo de caso do pavimento flexível em determinados pontos da zona urbana de Alegrete–RS**. 2013.

NOVIS, Luiz Eduardo Moraes. Estudo dos indicadores ambientais na construção Civil–Estudo de casos em 4 construções. **Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil)**. Rio de Janeiro. UFPJ. Escola Politécnica, 2013.

OLIVEIRA, Marcos; RUPPENTHAL, Janis. **Certificação Leed: O Incremento Da Inovação No Ambiente Construído Em Relação A Sustentabilidade**. Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, v. 12, n. 23, 2020.

OZTURK, Merve. **Comparison of Sustainability Assessment Tools for Highway Projects**. California State University, Long Beach, 2019.

PEREIRA, José Bráulio. Sustentabilidade: um desafio para engenharia. **Revista Instituto de Educação Tecnológica, Brasília**, 2016.

PEREIRA, Kettlyn Braga. **Logística Verde no Transporte Rodoviário: Uma Revisão Bibliográfica e Análise de Casos Práticos de Empresas que Operam no Brasil**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Nova Iguaçu, 2020.

PRESTON, Howard et al. **Systemic safety project selection tool**. United States. Federal Highway Administration. Office of Safety, 2013.

RAMANI, Tara et al. **A guidebook for sustainability performance measurement for transportation agencies**. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board. 191p. Washington, D.C. 2011.

REBITZER, Gerald et al. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment international**, v. 30, n. 5, p. 701-720, 2004.

RIBAS, Domingos António Garcia. **Metodologia de avaliação da sustentabilidade econômica de edifícios com base no ciclo de vida**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de Aveiro (Portugal).

ROCHA, Jorcelan; FERREIRA, Lucas; BORBA, Fernando. Diagnóstico de patologias encontradas em pavimentos rodoviários flexíveis e semirrígidos. **Enciclopédia Biosfera**, v. 16, n. 30, 2019.

DA ROCHA, Mariana Pereira. **Proposta de indicadores de sustentabilidade na gestão de resíduos de construção e demolição**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal).

DE LIMA, Lavoisiene Rodrigues; DE SOUZA FREIRE, Fátima; DA SILVA, Nilton Oliveira. Fallacies in Sustainability: a Systematic Review. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 17, n. 10, p. e04159-e04159, 2023.

SANTOS, Carlos RG. Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística. **São Paulo**, v. 27, 2011.

SILVA JÚNIOR, Iran Correia; JÚNIOR, Luiz de Pinedo Quinto. **Avaliação do método envision para infraestruturas brasileiras: estudo das usinas hidrelétricas de Santo Antônio do Jari e Santo Antônio**. X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental São Bernardo do Campo/SP. 2018.

SILVA, André Luiz Caetano da. **A relação entre barreiras e desafios para integração da sustentabilidade em projetos de construção**. 2021. Tese de Doutorado.

SILVA, Érica Santos. **As ISO 50001 e ISO 14040 aplicadas à indústria cimenteira: comparação entre fontes fóssil e renovável de energia térmica**. 2018.

SILVA, R. C. et al. Análises do Comportamento e Desempenho dos Pavimentos da Via040, Brasília/DF a Juiz de Fora/MG. **Revista ANTT**, v. 7, p. 1-15, 2015.

SIQUEIRA, Ciro Andrade et al. Análise comparativa do ciclo de vida de materiais estruturantes construtivos em um pavilhão aviário. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 1, p. 625-640, 2021.

SOUZA, Bianca Lídia Graças et al. **Influência da gestão e jurisdição das rodovias nos diferentes aspectos de sua qualidade funcional**. 2021.

SOUZA, Luciana de Paula. **Uso integrado das ferramentas de análise do ciclo de vida e de análise do custo do ciclo de vida em pavimentação**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

STARS (Sustainable Transportation Analysis and Rating System) - SCCRTC, **SCCRTC**, disponível em: <<https://sccrtc.org/projects/multi-modal/stars/>>. acesso em: 20 fev. 2024.

SUNRA Sustainability. **National Road Administrations Project Framework for a Sustainability-Rating System for Roads Organisational Level User Guide**. 2014. Disponível em: https://www.cedr.eu/download/other_public_files/research_programme/eranelt_road/c

all_2011/energy/sunra/06_sunra-project-framework-organisational-level-user-guide.pdf. Acesso em: 20 fev. 2024.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Sustentabilidade: o que é, tipos e exemplos.** Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/sustentabilidade/>. Acesso em: 20 jan. 2024.

TAVARES, Rodrigo. **ESG morreu.** 24 jan. 2024. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/colunas/rodrigo-tavares/2024/01/esg-morreu.shtml>. Acesso em: 28 jan. 2024.

GLOBAL ECOVILLAGE NETWORK. **The Ecovillage Impact Assessment.** Disponível em: https://ecovillage.org/impact/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAuNGuBhAkEiwAGld4as8NRuMjNtYrX9f_xNSxG-kN7qVvcukyNU2gAzDmO-ibD1om5gS6RRoCcAUQAvD_BwE. Acesso em: 20 fev. 2024.

TUNSTALL, Dan. Developing and using indicators of sustainable development in Africa: an overview. **Proceedings from the Network for Environment and Sustainable Development in Africa (NESDA).** NESDA, Banjul, The Gambia, 1994.

UNIVERSITY OF WASHINGTON. **'Greenroads' rates sustainable road projects.** 13 jan. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedaily.com/releases/2010/01/100113091646.htm>. Acesso em: 14 mar. 2024.

US EPA. A Project Selection Tool for the State of Rhode Island | Smart Growth | US EPA. Epa.gov. Disponível em: https://19january2017snapshot.epa.gov/smartgrowth/project-selection-tool-state-rhode-island_.html. Acesso em: 20 fev. 2024.

WAHRLICH, Júlia et al. Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida: uma revisão. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 183-201, 2020.

WALLS, James; SMITH, Michael R. Life-cycle cost analysis in pavement design. **Federal Highway Administration, Washington, DC FHWA report FHWA-SA-98-079**, 1998.

ZAUMANIS, Martins; JANSEN, Jan; SMIRNOVS, Juris. Calculation model of energy consumption inventory for comparison of Warm Mix Asphalt and Hot Mix Asphalt. In: **Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering. ICEE.** Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, 2011. p. 1246.

ZHANG, Lei et al. **MOSAIC: Model Of Sustainability And Integrated Corridors, phase 3: comprehensive model calibration and validation and additional model enhancement.** Maryland. State Highway Administration, 2015.