

Received:
October 15, 2020

Accepted:
October 31, 2020

Published:
November 1, 2020

Evaluation of the life cycle and the use of recyclable materials in paving

Gledsa Alves Vieira¹ , Rafael Ferreira Kunert¹ 

¹ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Teófilo Otoni, Brasil.

Email address

gledsavieira@gmail.com (Gledsa A. Vieira) – Corresponding author.
rafaelkunert@gmail.com (Rafael F. Kunert)

Abstract

Paving Engineering can be responsible for a considerable part of the environmental impact on infrastructure and construction projects. As a result, sustainability once again becomes a key research theme. This article aims to raise sustainable aspects related to LCA (Life Cycle Assessment), and its use in paving with recycled materials. With the increasingly frequent use of recycled or even reused materials, it is necessary to establish methodologies to quantify the level of sustainability of a product/process. Thus, results can be obtained that go beyond the life of the pavement, allowing a better understanding of the negative impacts, such as the energy demand involved in the construction, operation, and maintenance of the track. In addition, through weightings about each impact (environmental, social, and economic) it is possible to have better decision-making, as well as better optimization of applicable resources. The LCA allows the determination of a sustainability factor, being able to consider parities in the weightings, that is, 33.33% for each assessed impact (social, environmental, and economic). Or allocate 50% for environmental impact and 25% for social and economic impacts. A consideration is possible in which 50% weighting is adopted for economic impact and 25% for social and environmental impacts. This factor allows for better decision making, allowing to assess the pillar of greatest interest.

Keywords: Paving, Life cycle assessment, Sustainability, Recycled materials.

1. Introdução

O conceito de desenvolvimento sustentável como se conhece foi introduzido pelas Nações Unidas por meio da declaração de Brundtland, na década de 1980, como forma de se contrapor aos efeitos destrutivos do desenvolvimento econômico e social que predominava. Este conceito em si apresenta um significado muito amplo, porém que pode ser simplificado como um conjunto de medidas que levam em consideração os aspectos sociais, econômicos e ecológicos, visando as vantagens e desvantagens, bem como ações para curto e longo prazo (O'Brien, Doig e Clif, 1996; Azapagic, Perdan e Clift, 2004; Hosseinijou, Mansour e Shirazi, 2013).

Dentro do contexto da sustentabilidade pode-se observar um maior enfoque no que se refere à mudança climática e/ou ameaças ambientais e, para que possa ser possível um melhor enfrentamento

destes desafios, as tomadas de decisões, sejam elas por parte de empresas, indivíduos ou setores públicos devem integrar tais decisões e possíveis desafios devem agregar o espectro ambiental (Nilsson e Eckerberg, 2007). Conforme WCED (1987) busca-se por um desenvolvimento que atenda às necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender suas próprias necessidades. Nesse contexto, surgem técnicas que permitem avaliar os aspectos ambientais, sociais e econômicos que resultam em um fator de impacto sustentável.

Neste cenário, tem-se uma maior preocupação acerca da sustentabilidade, principalmente na indústria da construção e em setores correlatos, como o de pavimentação que, de uma forma geral, abrange obras de terraplenagem (diques e aterros em geral), construção, manutenção e reabilitação de vias, obras de drenagem em geral, obras de arte correntes (como pontilhões em geral) e obras de

artes especiais, como pontes, viadutos e tuneis (Lambe e Whitman, 1979; Chiu et al., 2008).

Tendo em vista este enfoque nas questões ambientais, aliadas à sustentabilidade, além da compreensão dos impactos associados ao meio produtivo, tem-se o interesse em ferramentas e/ou metodologias que permitem um melhor entendimento de tais questionamentos. Com isso, observa-se o surgimento de técnicas de avaliação de aspectos ambientais, sociais e econômicos que resultam em um parâmetro denominado fator de impacto sustentável. Das metodologias aplicáveis, destaca-se a Avaliação de Ciclo de Vida – ACV (ISO, 2006).

Finnveden et al. (2009) comenta que ACV ganha uma rápida notoriedade ainda na década de 1990, quando se tem os primeiros trabalhos abordando o tema, *e.g.* Guinée, Udo de Haes e Huppes (1993). Nesse período, tinha-se grandes expectativas sobre a ACV, no entanto, os resultados obtidos eram constantemente questionados *e.g.*: Udo de Haes (1993); Ayres (1995); Ehrenfeld (1998); Krozer e Viz (1998) e Finnveden (2000).

Devido a essa questão referente aos resultados obtidos, a ACV passa por um amplo desenvolvimento e conseqüentemente, uma maior harmonização o que resultou em uma normatização internacional, conhecida como ISO 14040:2006, que refere a gestão ambiental com enfoque na avaliação do ciclo de vida, além disso, houve uma complementação da norma por um conjunto de diretrizes e materiais de apoio *e.g.*: Wenzel et al. (1997); Guinée et al. (2002); Baumann e Tillman (2004). Com o surgimento de normatizações e diretrizes, houve um amadurecimento e conseqüentemente um ganho de robustez da ACV. Entretanto, é válido ressaltar que o método ainda se encontra em desenvolvimento, visto que existem diversas iniciativas para auxiliar na construção de um consenso e com isso, fornecendo novas recomendações para a metodologia (Finnveden et al., 2009).

Devida as possibilidades da ACV, pode-se aplicar esta a diversos setores, entre estes, o setor de pavimentação. Porém, devido a vasta extensão que uma rede rodoviária apresenta, é de se surpreender que pouco se sabe acerca dos impactos ambientais desta. Ressalta-se que, inicialmente, as ACVs voltadas para pavimentação abrangiam apenas alguns componentes do ciclo de vida de um pavimento, o que resulta em uma imagem incompleta e imprecisa dos reais impactos

ambientais. Há também ACVs que tentam incluir questões como tráfego e até mesmo a iluminação da via no escopo de trabalho, entretanto, mesmo com esses elementos inclusos, ainda faltam componentes que podem ser considerados como críticos para compreender a relação entre os pavimentos e o meio ambiente (Santero e Horvath, 2009).

Santero e Horvath (2009) ainda destacam que, não se tem um conceito para compreender se materiais, equipamentos e até mesmo o tráfego podem ser denominados como componente dominante ou se eles apenas contribuem com impactos que podem ser comparáveis. Para isso, a compreensão da importância de cada componente proverá informações cruciais para que se ter melhores práticas e conseqüentemente um desempenho ambiental aprimorado.

Ainda dentro do contexto da pavimentação, bem como da sustentabilidade, é observada uma maior utilização de materiais reciclados e/ou secundários, tanto em quantidade, quanto em variedade. Essa utilização permite um benefício duplo, pois promove uma redução na demanda de materiais de origem natural, além de promover uma redução na necessidade de utilização de aterros para a deposição de tais materiais (Hunag, Bird e Heidrich, 2009).

No entanto, segundo Hunag, Bird e Heidrich (2009), o desvio de resíduos de uma indústria para serem transformados em materiais para uma segunda indústria, neste caso, a indústria de agregados, já foi questionado, devido a pegada energética e as emissões de CO₂. Para os autores, esse ceticismo é decorrente de estudos que sugerem que o uso de alguns agregados, neste caso, o vidro, demandam de mais energia e conseqüentemente, tem-se uma maior liberação de CO₂ para o meio, quando comparado com o simples envio deste material para aterros.

Em um contexto mais abrangente, além de se conhecer os impactos ambientais de uma obra de pavimentação, a utilização de uma ACV permite conhecer os impactos em outras duas dimensões distintas, a social e a econômica (Elkington, 1998). Essa aplicabilidade em dimensões distintas, tendo como referência o ciclo de vida de um produto e/ou processo, se mostra fundamental para evitar problemas no sistema como um todo (Finnveden et al., 2009).

O presente trabalho exhibe uma revisão na literatura acerca dos conceitos referentes à ACV e seus aspectos para a sustentabilidade na utilização

de materiais recicláveis e/ou secundários na pavimentação.

2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

ACV é uma técnica utilizada para analisar e quantificar os impactos de um produto, sistema ou processo em três diferentes vertentes: ambiental (LCA – *Life Cycle Assessment*), econômica (LCC – *Life Cycle Cost*) e social (S-LCA – *Social Life Cycle Assessment*). Os processos e regras para a realização da ACV são definidos pela Organização Internacional de Padronização ISO 14040 (2006) e envolve quatro fases: (i) objetivo e escopo, (ii) análise de inventário, (iii) avaliação do impacto, e (iv) interpretação dos resultados.

Na primeira fase da ACV definem-se os objetivos e o escopo do estudo. Para isso, conforme a ISO 14040 (2006), o objetivo de um estudo da ACV deve declarar a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo, isto é, para quem se pretende comunicar os resultados da análise. Segundo Carvalho (2002), dentre os objetivos mais comuns na ACV pode-se citar a comparação de sistemas produtivos, avaliação dos impactos (ambientais, econômicos e sociais) gerados por um processo/produto, aplicação de selos verdes e a apresentação para o público quanto a recursos naturais utilizados. Para isso adota-se a unidade funcional.

A unidade funcional representa a quantificação do desempenho característico do produto em análise, com o propósito de fornecer uma referência para a qual os dados de entrada e saída possam ser relacionados. A definição da unidade funcional e das fronteiras do sistema são etapas substanciais para compor a segunda fase.

As fronteiras do sistema definidas para o ciclo de vida de um produto podem ser analisadas do “berço” ao “túmulo”, ou seja, desde a extração de matérias-primas, transportes, fabricação de produtos até o uso e disposição final. Vale ressaltar, que o intervalo de análise pode ser delimitado de acordo a necessidade do pesquisador. O nível de detalhe deve ser definido para alcançar os objetivos determinados, pois este limita a análise dos dados (fases iii e iv) devido a sua contribuição e relevância dos fluxos elementares e dados considerados no sistema de produto avaliado. A qualidade dos dados representa a integridade dos resultados e sua representatividade na aplicação do estudo.

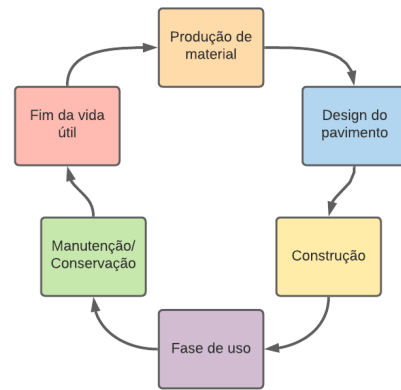


Figura 1 – Ciclo de vida do pavimento.

O ciclo de vida do pavimento, pode ser descrito a partir dos estágios pelos quais um pavimento passa desde a produção dos materiais até o final de sua vida útil, conforme ilustrado na Figura (1). A delimitação do sistema deve ser determinada para o emprego da (s) técnica (s) (LCA, LCC e S-LCA), a partir dessa definição realiza-se o inventário.

Uma LCA analisa os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida do pavimento. Segundo o *Building Research Establishment* (BRE, 2013) indica-se os seguintes impactos ambientais: mudança climática, depleção da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica e depleção dos recursos naturais. Neste contexto, avalia-se o desempenho ambiental, de um produto ou processo, ao longo de seu ciclo de vida. A depender da limitação do sistema, pode-se incluir na avaliação a aquisição de matéria-prima, produção, uso, disposição final ou reciclagem, e o transporte necessário entre essas fases.

A integração do modelo LCA e LCC possibilita uma avaliação dos custos econômicos, neste caso o ciclo de vida de um pavimento. O modelo LCA fornece os dados necessários para uma LCC abrangente, possibilitando a quantificação dos encargos ambientais e sociais (Keoleian et al., 2005).

A terceira vertente, a S-LCA, ainda é considerada em fase inicial, embora a ideia não seja nova (Öko-Institut. Projektgruppe Ökologische Wirtschaft, 1987; Manhat e Griebhammer, 2007). Hurley e Prowell (2006) conseguiu quantificar os impactos sociais, por meio do tempo de trabalho gasto para produzir o produto. Este tempo deve ser determinado como parte do inventário, considerando-se a unidade funcional. É preciso determinar a área de abrangência da obra, e assim, a

regionalização deve ser bem desenvolvida no inventário e no LCA. Saber o horário de trabalho por unidade funcional, e utilizando estatísticas nacionais é possível calcular quantas horas uma pessoa precisa trabalhar para garantir o seu sustento. Esta avaliação pode ser considerada como uma avaliação de impacto social, considerando que as horas de trabalho não ponderadas pertencem ao inventário.

A ACV fornece uma abordagem abrangente para avaliar os impactos totais relacionados de um produto e/ou processo, examinando todas as entradas e saídas ao longo do ciclo de vida. Esta abordagem permite identificar onde o impacto mais relevante ocorre e onde as melhorias mais significativas podem ser realizadas.

3. Resíduos reciclados e a ACV

3.1. A utilização de materiais reciclados na pavimentação

Praticamente quase todas as atividades, sejam elas industriais ou humanas produzem quantidades de resíduos cada vez mais elevadas e essa elevação ocasiona um aumento na quantidade acumulada em locais de deposição destes materiais, ocasionando graves problemas de cunho ambiental e econômico. É um dos “players” deste crescimento são os seguimentos de construção e demolição, sendo que os resíduos produzidos em sua totalidade são de resíduos de origem mineral ou solo (e.g.: material proveniente de escavações, entulho proveniente de demolições, material estéril proveniente de atividades de mineração, dentre outros). Além disso, o descarte destes materiais muitas vezes se dá em aterros, o que gera uma sobrecarga nestes locais ou mesmo a constante necessidade de expandi-los (Cardoso et al., 2015).

Sivakumar, McKinley e Ferguson (2004) destaca que existe uma tendência de que a reciclagem e posterior reutilização de resíduos de construção e demolição podem proporcionar benefícios consideráveis no que se refere ao fornecimento de materiais, bem como reduzindo o custo de descarte e impacto ambiental, aliando a uma maior sustentabilidade.

No Brasil, a quantidade de resíduos de construção civil produzida é estimada em cerca de 45 milhões de toneladas, sendo que, a produção diária é estimada em torno de 124 mil toneladas (ABRELPE, 2018).

Ainda no contexto brasileiro, a utilização de resíduos reciclados na pavimentação é preconizada por norma técnica NBR 15115 (2004) que aborda essa questão.

3.2. O uso de resíduos reciclados e a avaliação do ciclo de vida

Conforme exposto por Elkington (1998), a avaliação de ciclo de vida pode abranger 3 dimensões distintas: a ambiental, a econômica e a social. Neste contexto, o presente trabalho separa estas 3 dimensões para melhor compreensão de cada uma destas.

3.2.1. O uso de resíduos reciclados e a avaliação do ciclo de vida no aspecto ambiental

A pegada ecológica de um pavimento pode ser medida por meio do conjunto de impactos decorrentes ao longo do tempo de seu ciclo de vida, que se inicia na extração das matérias-primas e finalizando em diversos cenários de final de vida. No entanto, caso sejam omitidos elementos individuais ou conjuntos desses elementos durante um processo de ACV, pode-se obter conclusões incompletas (Santero, Masanet e Horvarth, 2009; 2011).

Ainda segundo Santero, Masanet e Horvarth (2009; 2011), essa omissão de informações pode se problemática, uma vez que os elementos omitidos geralmente são aqueles que costumam ocasionar os impactos ambientais mais consideráveis na pegada ecológica de um pavimento. Para isso, os autores destacam ser fundamental uma análise do conjunto de elementos levando em consideração as questões resultantes da interação entre o pavimento e o meio ambiente.

Incorporar materiais recicláveis no processo construtivo de rodovias em detrimento de materiais de origem natural denominados virgens promove uma oportunidade para a economia de recursos naturais, bem como reduzir ou mesmo evitar impactos ambientais decorrentes da extração, beneficiamento e transporte de tais materiais (Chiu et al., 2008).

Além da questão da origem do material, outro aspecto de grande importância a se levar em consideração em uma ACV para pavimento é no que tange à questão da energia. Para Chiu et al. (2008), o consumo energético na pavimentação dependerá da técnica empregada. Ainda segundo os autores, é

necessário considerar todo o ciclo de vida da via, ou seja, considerar etapas além da construção, neste caso, serão consideradas também as energias necessárias para a manutenção e operação da via.

No entanto, segundo Lee et al. (2010), caso haja o emprego de materiais recicláveis na via, poderá se ter uma redução considerável no consumo energético ao longo da vida útil da via.

Essa questão das energias é demonstrada pelas Tabelas (1) e (2).

Tabela 1 – Energias obtidas por meio de ACV para uma via de 1km durante 40 anos de operação (adaptado de Chiu, Hsu e Yang, 2008).

Etapa	Asfáltico – à quente (TJ)	Asfáltico – à frio (TJ)	Concreto (TJ)
Constr.	8.0	6.5	11.5
Oper.	12.0	11.5	13.0
Manut.	3.0	3.5	3.0
Total	23.0	21.5	27.0

Tabela 2 – Comparativo entre as energias necessárias para pavimentação usando materiais tradicionais e reciclados (adaptado de Lee et al., 2010).

	Materiais Tradicionais			Materiais Reciclados			Diferença
	Prod.	Transp.	Constr.	Prod.	Transp.	Constr.	
Construção	66.680	4.318	1.476	58.023	2.187	724	-16%

No geral, a maior parte das plantas de beneficiamento de materiais recicláveis industriais que podem ser utilizados em pavimentação se encontram nas proximidades de zonas de alta densidade populacionais, sugerindo que haverá uma maior demanda de materiais nestes locais. Reforça-se essa questão com o fato de que, muitas vezes, essas regiões com alta produção de materiais industriais que podem ser reciclados, muitas vezes não possuem capacidade de produção de agregados naturais que permitem o atendimento da demanda local, assim, os materiais recicláveis podem vir a serem utilizados como complemento ou mesmo substitutos (Robinson, Menzie e Hyun, 2004; Carpenter et al., 2007)

O transporte é evidenciado como um dos principais parâmetros econômicos que podem fazer com que a utilização de materiais recicláveis se torne inviáveis, dada as distâncias envolvidas (Chowdhury, Apul e Fry, 2010). Além desta questão referente ao transporte, Carpenter et al. (2007), destaca que a utilização de um subproduto industrial, neste caso, materiais reciclados, auxiliam não só na redução dos impactos ambientais associados, mas também promove uma redução dos

Para se ter uma abordagem sustentável no que se refere ao uso e consumo de materiais se dá ainda nas etapas de design e planejamento da via, na qual pode se optar por reutilizar e/ou incorporar subprodutos que seriam encaminhados para a o descarte. Idealmente, produtos podem ser projetados para serem submetidos a processos de reciclagem ao longo do seu ciclo de vida, o que de certa forma, limitaria a geração de resíduos (Lee et al., 2010).

3.2.2. O uso de resíduos reciclados e a avaliação do ciclo de vida no aspecto econômico

Do ponto de vista econômico, o aspecto de maior relevância para a utilização de materiais recicláveis em grandes volumes se refere ao transporte entre o local de produção e de utilização de tais. (Carpenter et al., 2007).

custos decorrentes de taxas por conta de despejo e/ou utilização de aterros. Por meio do comparativo demonstrado na Figura (2), pode-se observar que a utilização de agregados de origem recicladas pode se mostrar inviável se for considerar apenas a distância de transporte.

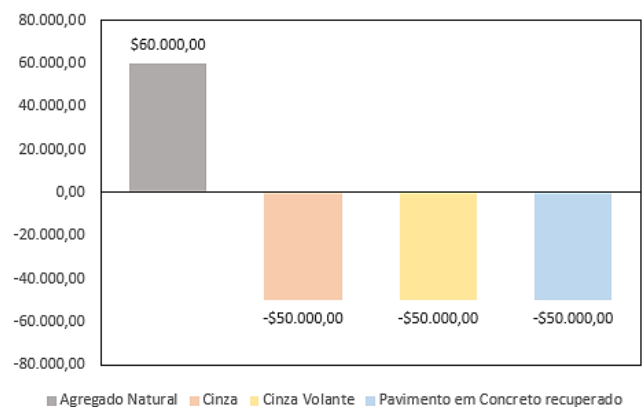


Figura 2 – Custo de diferentes materiais para construção, em dólares (adaptado de Chowdhury, Apul e Fry, 2010).

Levar em consideração os custos em uma ACV permite alcançar estimativas de investimentos de longo prazo que se mostram economicamente razoáveis que contempla a viabilidade econômica

total e a longo prazo para diferentes opções de investimentos. No cenário econômico, diversas agências do setor de pavimentos têm empregado a abordagem da ACV considerando os custos de uma forma geral para verificar a viabilidade econômica de projetos de pavimentos em longo prazo, por permitir uma avaliação de maneira mais realista sobre o potencial econômico de um pavimento (AASHTO, 1986; Lamptey Labi e Sinha, 2004; Babashamsi et al., 2016).

3.2.3. A pavimentação e a avaliação do ciclo de vida no aspecto social

Além das análises nos aspectos ambientais e econômico, uma ACV pode ser utilizada para avaliar o impacto social resultante ao longo do ciclo de vida de um produto ou mesmo ao longo de suas etapas produtivas. Tal avaliação permite conhecer o bem estar da população local e auxiliar na elaboração de estratégias que visam a melhoria para a comunidade local (Benoît et al., 2010).

Entretanto, quando se avalia o espectro social de um produto em uma ACV, acaba-se adentrando nos espectros ambiental e econômico, respectivamente, pois, para que se possa ter um produto sustentável, primeiramente deve-se levar em consideração se este terá ou não um design sustentável. Além do design, a escolha dos materiais também é um aspecto fundamental, pois se trata de uma atividade multidisciplinar, abrangendo um amplo campo de conhecimento e domínio (Hosseiniyou, Mansour e Shirazi. 2013).

No entanto, deve-se ressaltar que existem ao menos quatro problemas que estão correlacionados com os materiais em si e não possuem uma solução bem definida: o consumo excessivo, utilização excessiva de recursos naturais, poluição e superpopulação, conforme Ljungberg (2007) em seu trabalho. O autor ainda sugere que, a sustentabilidade de um produto que é baseado em materiais depende de como esses são usados no bem em si ou ao longo de sua vida útil. Além disso, é destacado que nenhuma decisão perante a escolha do material deverá apenas capturar o aspecto funcional necessário para a aplicação em si, mas far-se-á necessário conhecer os impactos em todos os espectros da vida útil do produto.

Como nenhum desenvolvimento pode ser estável a longo prazo sem que haja justiça social e, neste caso, a ACV deve ser desenvolvida e considerada (Hosseiniyou, Mansour e Shirazi.

2013). Essa questão é reforçada por meio da diretriz UNEP/SETAC, das Nações Unidas, onde a ACV social é definida como a técnica para avaliação dos impactos sociais com interesse nos aspectos sociais e socioeconômicos atrelados ao ciclo de vida de um produto, bem como os impactos positivos e negativos que podem ocorrer ao longo deste período (Benoît e Mazijn, 2009).

De uma forma geral, a ACV social ou mesmo uma ACV que aborde todos os espectros oferece uma possibilidade de se observar quais os setores da sociedade que estão sendo mais impactados e como estes se organizam e se sustentam, ou seja, pode-se ter indicativos de como impactos ambientais, sejam estes diretos ou indiretos, quanto os impactos sociais e suas rotas de impacto, bem como a organização e controle destes (O'brien, Doig e Clif, 1996).

No contexto da pavimentação, Choi et al. (2016) destacam que, as atividades desse segmento geram impactos significativos nos espectros ambiental, social e econômico e, que, para promover essa redução é interessante que se adote pavimentos com elevada vida útil e baixa manutenção. Sendo assim, a ACV acaba se tornando uma ferramenta fundamental para essa seleção.

No que se refere aos impactos sociais gerados pela pavimentação, pode-se elencar duas categorias distintas, os impactos negativos e os positivos, conforme destacado por Choi et al. (2016) e Inti (2016). No caso dos impactos negativos, os autores elencam principalmente a questão do uso do solo, movimentação decorrente do transporte e barulho. No caso do aspecto positivo, tem-se a possibilidade de melhoria na renda das comunidades no entorno das vias.

A movimentação por transporte pode se referir a questão da utilização de infraestruturas aéreas, terrestres ou aquaviária para movimentação de bens ou prestação de serviços. No que se refere ao uso do solo, geralmente, projetos de melhorias na infraestrutura de transportes provocam impactos duradouros nas comunidades próximas, empreendimentos comerciais e no planejamento e uso do solo nas proximidades da via (Choi et al, 2016)

Inti (2016) destaca que o ruído é um impacto a se levar em consideração em todo o ciclo de vida de uma via pavimentada, pois em todas as etapas se pode identificar a ocorrência deste, seja decorrente de maquinário ou por causa do deslocamento de

veículos ao longo do trecho. De certa forma, os efeitos do ruído podem ser classificados em 3 categorias distintas:

1. Efeitos primários: podem ocasionar danos na audição humana como trauma acústico, zumbido, dentre outros;
2. Efeitos na comunicação e desempenho: podem comprometer a capacidade de entendimento da fala, concentração e ocasionar distúrbios sociais adversos;
3. Outros efeitos: associados à fisiologia humana, como problemas hormonais, fadiga, alterações no sono, dentre outros.

Além dos efeitos na saúde e comportamento humano, o ruído excessivo impacta nos valores de propriedades localizados nas proximidades, entretanto, a escala do impacto tende a variar em função da natureza do uso do solo no local (Inti, 2016).

No que se refere ao aspecto positivo, Rephann e Isserman (1994) e posteriormente, Kim e Han (2016) demonstram que o investimento em rodovias pode servir como uma ferramenta para o desenvolvimento socioeconômico, uma vez que localidades próximas à grandes cidades acabam se beneficiando e isso acaba impactando positivamente na renda familiar proveniente dos setores de manufatura e varejo. Além disso, Inti (2016) indica que, por mais que existe o impacto ambiental associado às rodovias, observa-se um incremento na qualidade de vida das comunidades próximas.

4. Conclusão

Pode-se dizer que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica desenvolvida para mensuração dos possíveis impactos ambientais causados como resultado da produção e utilização de determinado produto ou serviço. A abordagem sistêmica da ACV é conhecida como do “berço ao túmulo”, na qual são levantados os dados em todas as fases do ciclo de vida do produto. O ciclo de vida refere-se a todas as etapas de produção e uso do produto, relativas à extração das matérias-primas, passando pela produção, distribuição até o consumo e disposição final, contemplando também reciclagem e reuso quando for o caso.

Por meio de uma ACV, pode-se compreender os impactos sociais, ambientais e econômicos de um produto ao longo de sua vida útil, ou seja, partindo da concepção e produção até o descarte e disposição final deste. Além disso, essa ferramenta permite a determinação de um índice de sustentabilidade, podendo levar em consideração paridades nas ponderações, ou seja, 33,33% para cada impacto avaliado (social, ambiental e econômico). Ou ainda atribuir 50% para o impacto ambiental e 25% para os impactos sociais e econômicos. É possível uma consideração na qual tem-se 50% de ponderação para o impacto econômico. Tal índice favorece uma melhor tomada de decisão, permitindo avaliar o pilar de maior interesse ou equipará-los.

Neste contexto, a ACV é utilizada tanto por pesquisadores, que buscam ampliar a base científica de conhecimento sobre sistemas produtivos e suas relações com o meio ambiente, quanto pela indústria, que pode aumentar a eficiência de seus processos, reduzir custos e ainda promover o marketing verde de seus produtos. O setor governamental também pode se amparar em resultados de estudos ACV para elaborar e fomentar políticas públicas que respeitem o meio ambiente e incentivem práticas sustentáveis.

Contudo, ainda que uma ACV possa se mostrar uma ferramenta de grande valia para a análise de impactos ao longo da vida útil de um produto, é necessário que haja uma maior compreensão e exploração do aspecto social desta ferramenta quando aplicada à pavimentação. Para isso, é de fundamental importância a realização de estudos futuros, no intuito de qualificar e quantificar, os reais impactos sociais que a pavimentação pode vir ocasionar em uma determinada comunidade.

Referências

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials, 1986. *AASHTO guide for design of pavement structure*. Washington (D.C.)

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. *NBR 15.115/04: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – execução de camadas de pavimentação – procedimento*. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.

- ABRELPE. – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2018. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: 2017. Brasil. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais*. 73.
- Ayres, R.U., 1995. *Life cycle analysis: A critique*. Resources, Conservation and Recycling, 14(3–4), pp.199–223. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(95\)00017-D](https://doi.org/10.1016/0921-3449(95)00017-D)
- Azapagic, A., Perdan, S. and Clift, R., 2004. *Sustainable development in practice : case studies for engineers and scientists*. Chichester, West Sussex, England ; Hoboken, Nj: John Wiley & Sons. <http://doi.org/10.1002/0470014202>
- Babashamsi, P., Md Yusoff, N.I., Ceylan, H., Md Nor, N.G. and Salarzadeh Jenatabadi, H., 2016. *Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis*. International Journal of Pavement Research and Technology, 9(4), pp.241–254. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.004>
- Baumann, H. and Tillman, A.M., 2004. *The hitch hiker's guide to LCA : an orientation in life cycle assessment methodology and application*. Lund, Sweden: Studentlitteratur.
- Benôit, C., Norris, G.A., Valdivia, S., Citroth, A., Moberg, A., Bos, U., Prakash, S., Ugaya, C. and Beck, T., 2010. *The guidelines for social life cycle assessment of products: just in time!* The International Journal of Life Cycle Assessment, 15(2), pp.156–163. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0147-8>
- Benoît C. and Mazijn B., 2009 *Guidelines for social life cycle assessment of products*. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, Druk in de weer, Belgium.
- BRE - Building Research Establishment, 2013. *Environmental Profiles 2013: product Category Rules for type III Environmental Product Declaration of Construction Products to EN 15804:2012* (Watford, UK).
- Cardoso, R., Silva, R.V., Brito, J. de and Dhir, R., 2016. *Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review*. Waste management (New York, N.Y.), 49, pp.131–145. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.021>
- Carpenter, A.C., Gardner, K.H., Fopiano, J., Benson, C.H. and Edil, T.B., 2007. *Life cycle based risk assessment of recycled materials in roadway construction*. Waste Management, 27(10), pp.1458–1464. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.007>
- Carvalho, J., 2002. *Análise de ciclo de vida ambiental aplicada a construção civil – Estudo de caso: comparação entre cimentos Portland com adição de resíduos*. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.
- Chiu, C.-T., Hsu, T.-H. and Yang, W.-F., 2008. *Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements*. Resources, Conservation and Recycling, 52(3), pp.545–556. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.07.001>
- Choi, K., Lee, H.W., Mao, Z., Lavy, S. and Ryoo, B.Y., 2016. *Environmental, Economic, and Social Implications of Highway Concrete Rehabilitation Alternatives*. Journal of Construction Engineering and Management, 142(2), p.04015079. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001063](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001063)
- Chowdhury, R., Apul, D. and Fry, T., 2010. *A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction*. Resources, Conservation and Recycling, 54(4), pp.250–255. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.007>
- Ehrenfeld, J.R., 1997. *The Importance of LCAs—Warts and All*. Journal of Industrial Ecology, 1(2), pp.41–49. <https://doi.org/10.1162/jiec.1997.1.2.41>
- Elkington, J., 1998. *Cannibals with forks : the triple bottom line of 21st century business*. Gabriola Island, Bc ; Stony Creek, Ct: New Society Publishers.
- Finnveden, G., 2000. *On the limitations of life cycle assessment and environmental systems analysis tools in general*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 5(4), pp.229–238. <https://doi.org/10.1007/BF02979365>
- Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A.,

- Pennington, D. and Suh, S., 2009. *Recent developments in Life Cycle Assessment*. Journal of Environmental Management, 91(1), pp.1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Guinée, J.B., Udo de Haes, H.A. and Huppes, G., 1993. *Quantitative life cycle assessment of products*. Journal of Cleaner Production, 1(1), pp.3–13. [https://doi.org/10.1016/0959-6526\(93\)90027-9](https://doi.org/10.1016/0959-6526(93)90027-9)
- Guinée, J.B., 2002. *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Hosseiniyou, S.A., Mansour, S. and Shirazi, M.A., 2013. *Social life cycle assessment for material selection: a case study of building materials*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 19(3), pp.620–645. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-013-0658-1>
- Huang, Y., Bird, R. and Heidrich, O., 2009. *Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements*. Journal of Cleaner Production, 17(2), pp.283–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.005>
- Hurley G. e Prowell B., 2006, *Avaliação de processos potenciais para uso a quente Misturas de asfalto*. Associação de Tecnólogos em Pavimentação de Asfalto, 75, pp.41-85.
- Inti, S., 2016. *A decision-making approach for selection of sustainable pavements in Texas by integrating life cycle cost analysis (LCCA), life cycle assessment (LCA) of environmental and social impacts*. ProQuest Dissertations and Theses, 269.
- ISO – International Organization for Standardization, 2006. *ISO 14040 – International standard. In: Environmental management – life cycle assessment – principles and framework*. ISO, Geneva, Switzerland.
- Keoleian, G.A., Kendall, A., Dettling, J.E., Smith, V.M., Chandler, R.F., Lepech, M.D. and Li, V.C., 2005. *Life Cycle Modeling of Concrete Bridge Design: Comparison of Engineered Cementitious Composite Link Slabs and Conventional Steel Expansion Joints*. Journal of Infrastructure Systems, 11(1), pp.51–60. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:1\(51\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(51))
- Kim, J.Y. and Han, J.H., 2016. *Straw effects of new highway construction on local population and employment growth* Habitat International, 53, pp.123–132. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.11.009>
- Krozer, J. and Vis, J.C., 1998. *How to get LCA in the right direction?*. Journal of Cleaner Production, 6(1), pp.53–61. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(97\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(97)00051-6)
- Lambe, W.T. and Whitman, R.V., 1979. *Soil mechanics*. New York: Wiley.
- Lampthey, G. Labi, S. and Sinha, K.C., 2004. *Development of Alternative Pavement Rehabilitation and Maintenance Strategies for Pavement Management*. 83rd Annual TRB Meeting, Washington, DC.
- Lee, J.C., Edil, T.B., Tinjum, J.M. and Benson, C.H., 2010. *Quantitative Assessment of Environmental and Economic Benefits of Recycled Materials in Highway Construction*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2158(1), pp.138–142. <http://dx.doi.org/10.3141/2158-17>
- Ljungberg, L.Y., 2007. *Materials selection and design for development of sustainable products*. Materials & Design, 28(2), pp.466–479. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.09.006>
- Manhart, A. and Griebhammer, R., 2007. *Social Impacts of the Production of Notebooks*. Platform presentation at the 3rd International Conference on Life Cycle Management Zurich, 27–29 August 2007.
- Nilsson, M. and Eckerberg, K., 2007. *Environmental policy integration in practice: shaping institutions for learning*. London; Sterling, Va: Earthscan.
- O'Brien, M., Doig, A. and Clift, R., 1996. *Social and environmental life cycle assessment (SELCA)*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1(4), pp.231–237. <https://doi.org/10.1007/BF02978703>

- Öko-Institut. Projektgruppe Ökologische Wirtschaft, 1987. *Produktlinienanalyse: Bedürfnisse, Produkte und ihre Folgen*. Köln: Kölner Volksblatt Verl.
- Rephann, T. and Isserman, A., 1994. *New highways as economic development tools: An evaluation using quasi-experimental matching methods*. *Regional Science and Urban Economics*, 24(6), pp.723–751. [https://doi.org/10.1016/0166-0462\(94\)90009-4](https://doi.org/10.1016/0166-0462(94)90009-4)
- Robinson, G.R., Menzie, W.D. and Hyun, H., 2004. *Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region, USA*. *Resources, Conservation and Recycling*, 42(3), pp.275–294. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.04.006>
- Santero, N.J., 2009. *A Life-Cycle Assessment Approach*. University of California at Berkeley, Berkeley.
- Santero, N.J. and Horvath, A., 2009. *Global warming potential of pavements*. *Environmental Research Letters*, 4(3), pp.034011. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/034011>
- Santero, N., Masanet, E., and Horvath, A., 2009. *A Critical Review of Existing Literature and Research*. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2009.
- Santero, N.J., Masanet, E. and Horvath, A., 2011. *Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps*. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), pp.810–818. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>
- Sivakumar, V., McKinley, J.D. and Ferguson, D., 2004. *Reuse of construction waste: performance under repeated loading*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 157(2), pp.91–96. <https://doi.org/10.1680/geng.2004.157.2.91>
- Udo de Haes, H.A., 1993. *Applications of life cycle assessment: expectations, drawbacks, and perspectives*. *Journal of Cleaner Production*, 1(3–4), pp.131–137. [https://doi.org/10.1016/0959-6526\(93\)90002-S](https://doi.org/10.1016/0959-6526(93)90002-S)
- Wenzel, H., Hauschild, M., Alting, L. and Overcash, M., 1999. *Environmental assessment of products volume 1: Methodology, tools, and case studies in product*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4. <https://doi.org/10.1007/BF02979388>
- WCED - World Commission on Environment and Development, 1987. *Our common future*. Oxford University Press, Oxford.