

19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



## 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

### AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA AMBIENTAL DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO PURO E COM ADIÇÃO DE SACOLAS PLÁSTICAS

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

*Gledsa Alves Vieira<sup>1</sup>; Rafael Ferreira Kunert<sup>1</sup>*

#### RESUMO

Projetos de pavimentação podem apresentar um elevado impacto ambiental. Neste cenário, a sustentabilidade tem sido um tema de grande importância para a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e técnicas. O presente artigo tem como objetivo realizar a identificação e quantificação, mediante a utilização da metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), de dois ligantes asfálticos: o cimento asfáltico de petróleo (CAP) puro e o cimento asfáltico de petróleo substituído parcialmente por polietileno de alta densidade (PEAD - sacolas plásticas). Com a elevada demanda por materiais poliméricos, é necessário estabelecer aplicabilidades para estes resíduos. Neste cenário, a partir da ACV foi possível quantificar o potencial de impacto ambiental dos materiais (CAP e CAP+PEAD). Essa abordagem permite compreender critérios relativos tanto à vida útil do pavimento, quanto aos impactos decorrentes de emissões de gases do efeito estufa, uso de recursos não renováveis e os impactos nos ecossistemas terrestres e aquáticos. Essas ponderações permitem compreender quais as melhores opções a serem utilizadas, de forma a contribuir positivamente para a redução da pegada de carbono de projetos de pavimentação, bem como a compreensão dos efeitos que estes produtos podem provocar no meio ambiente como um todo.

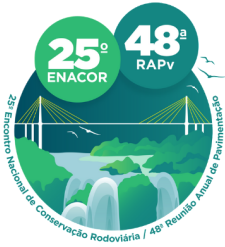
**PALAVRAS-CHAVE: AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA; PAVIMENTOS SUSTENTÁVEIS; ASFALTOS MODIFICADOS**

#### ABSTRACT

Paving projects can have a high environmental impact. In this scenario, sustainability has been a topic of great importance for the research and development of new materials and techniques. This paper aims to perform the identification and quantification, by using the methodology of Life Cycle Assessment (LCA), of two asphalt binders: pure petroleum asphalt cement (PAC) and petroleum asphalt cement partially replaced by high-density polyethylene (HDPE - plastic bags). With the high demand for polymeric materials, it is necessary to establish applicability for these wastes. In this scenario, from the LCA it was possible to quantify the potential environmental impact of the materials (PAC and PAC+HDPE). This approach allows to understand criteria related to both the sidewalk's useful life and the impacts resulting from greenhouse gas emissions, use of non-renewable resources, and the impacts on terrestrial and aquatic ecosystems. These considerations allow for an understanding of the best options to be used in order to positively contribute to reducing the carbon footprint of paving projects, as well as an understanding of the effects that these products can have on the environment as a whole.

**KEY WORDS: Life cycle assessment; sustainable pavements; modified asphalts**

<sup>1</sup> Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), [gledsavieira@gmail.com](mailto:gledsavieira@gmail.com), [rafaelkunert@gmail.com](mailto:rafaelkunert@gmail.com)



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



## 1. INTRODUÇÃO

As bases para o conceito de desenvolvimento sustentável foram introduzidas, pela Declaração de Brundtland das Nações Unidas na década de 1980, como uma forma de se contrapor aos efeitos destrutivos do desenvolvimento econômico e social predominante nesta época. De forma geral, esse conceito pode ser descrito de forma simples como um conjunto de medidas que consideram os aspectos sociais, econômicos e ecológicos, visando vantagens e desvantagens e as ações a serem tomadas em curto e longo prazo (O'BRIEN, DOIG e CLIF, 1996; AZAPAGIC, PERDAN E CLIFT, 2004; HOSSEINIJOU, MANSOUR e SHIRAZI, 2013; VIEIRA E KUNERT, 2020).

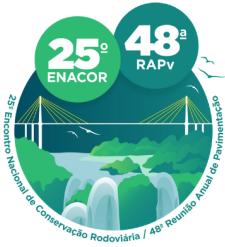
Ao se explorar o contexto da sustentabilidade, é comumente dado um maior enfoque às mudanças climáticas e/ou ameaças ao meio ambiente, permitindo assim um melhor enfrentamento dos desafios relacionados a essas duas questões e, por consequência, permitir uma melhor tomada de decisão por parte de empresas, indivíduos ou entes públicos e integrando tais decisões que possam vir a agregar o espectro ambiental (NILSSON e ECKERBERG, 2007). No entanto a WCED (1987), destaca a necessidade de buscar um desenvolvimento que permita atender as necessidades e anseios da atual geração, porém, sem comprometer a capacidade das gerações futuras em atender suas próprias necessidades. Neste contexto, surgem técnicas e ferramentas para avaliar os aspectos ambientais, sociais e econômicos que possam resultar em um fator de impacto sustentável positivo.

Entretanto, pode-se observar que as redes de mobilidade (*e.g.*: estradas) encontram-se em um ritmo de expansão acelerada. Em decorrência dessa expansão, os aspectos ambientais e sustentáveis de projetos de pavimentação, até então negligenciados, passaram a ser uma constante preocupação, assim como os aspectos relacionados ao crescimento econômico (CIGU; AGHEORGHIESEI; TOADER, 2019).

Esses aspectos passaram a ter relevância, uma vez que projetos de pavimentação possuem custos elevados, na qual estão considerados os custos de implantação, operação, manutenção e descarte. Entretanto, além dos custos econômicos, a expansão de projetos de mobilidade acaba por impactar o meio ambiente, especialmente no que se refere à sustentabilidade dos projetos, devido à emissão de poluentes diversos, consumo de agregados e combustíveis. Além disso, é necessário considerar os impactos decorrentes de poluição sonora, durante uma obra de pavimentação (ALALOUL *et. al.*, 2021).

Neste contexto, tem-se o surgimento de técnicas que permitem avaliar todos os aspectos relacionados às questões ambientais, econômicas e sociais e que resultam em parâmetros que avaliam o impacto sustentável. De todas as metodologias que permitem essa avaliação, tem-se destaque para a Avaliação de Ciclo de Vida – ACV (ISO, 2006).

A ACV ganha notoriedade ainda na década de 1990, quando surgem os primeiros trabalhos relacionados ao tema, como Guinée, Udo de Haes e Huppés (1993). Neste período, houve grandes expectativas sobre a ACV, porém, os resultados apresentados eram constantemente questionados, como nos trabalhos de Udo de Haes (1993); Ayres (1995); Ehrenfeld (1998); Krozer e Vis (1998) e Finnveden (2000) (FINNVEDEN *et. al.*, 2009). Devido a estes questionamentos, a ACV passou por um desenvolvimento e refinamento, resultando em uma maior harmonização, o que resultou em uma normatização em nível internacional, denominada ISO 14040:2006, que trata da gestão ambiental, dando foco na avaliação de ciclo de vida. A fim de melhorar a aplicabilidade, houve a complementação da norma por meio de um conjunto de diretrizes e materiais de apoio,



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



como aqueles desenvolvidos por Wenzel *et. al.* (1997); Guinée *et. al.* (2002); Baumann e Tillman (2004).

Santero e Hovarth (2009) destacam que uma ACV pode ser aplicável em diversos setores, entre os quais, o de pavimentação. No entanto, em decorrência da vasta extensão que uma rede rodoviária pode apresentar, é de se surpreender que há poucos estudos acerca dos impactos ambientais. Sendo assim, os primeiros estudos de uma ACV aplicada em rodovias e/ou pavimentos abrange apenas uma parcela dos componentes do ciclo de vida destes e, por consequência, obtinham-se resultados incompletos e imprecisos dos reais impactos ambientais gerados.

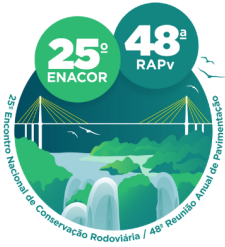
Essa imprecisão está relacionada à variabilidade inerente aos processos e materiais envolvidos, referentes ao período do início ao fim do ciclo da vida útil de um pavimento. Os modelos existentes para tais análises podem ser subdivididos em: extração e beneficiamento dos materiais, construção, uso, manutenção e/ou reabilitação e fim da vida. Outro fator variável é o ciclo de vida para todos os elementos analisados, o que resulta em diferentes períodos temporais de análises. Além disso, em muitos casos, os modelos utilizados não incorporam todos os componentes descritos anteriormente (YU e LU, 2012; ALALOUL *et. al.*, 2021). Ademais, Yu e Lu (2012) destacam que alguns elementos de importante consideração em uma ACV de pavimentos, como uso, congestionamentos decorrentes de atividades relacionadas à construção, manutenção e reabilitação de vias, muitas vezes não são considerados, pois apresenta uma elevada complexidade. Outros autores como Huang, Bird e Bell (2009) expõem que obras rodoviárias impactam diretamente no consumo de combustíveis e por consequência, na emissão de poluentes, em decorrência destes congestionamentos.

Santero e Hovarth (2009) ponderam que não há um conceito que permita compreender se os materiais, equipamentos e até mesmo o tráfego são considerados elementos dominantes ou se contribuem apenas com impactos que podem ser considerados comparáveis. Para tal, é necessário que se tenha um entendimento da importância de cada elemento e as informações que podem ser extraídas destes. Permitindo assim, melhores práticas, e consequentemente, obtendo-se um desempenho ambiental aprimorado.

Heidari, Heravi e Esmaeli (2020), expõem que em uma ACV de pavimentos, os impactos econômicos serão afetados por inconsistências, tais como: taxa de crescimento do tráfego, taxas de desconto e até mesmo os custos individuais e compostos. Caso se tenha uma flexibilidade para alterações no projeto, à medida que novos dados são obtidos, os parâmetros avaliados podem ser refinados, e consequentemente, permitindo uma avaliação com maior precisão.

Uma forma de melhorar o índice de sustentabilidade da pavimentação é a utilização de materiais reciclados, conforme sugerido por Huang, Bird e Heidrich (2009); Li, Xiao, Zhang e Amirkhanin (2019); Hasan, Whyte e Al Jassmi (2020); Oreto *et. al.* (2021). Outro exemplo, são os trabalhos na qual compara-se o ciclo de vida de diferentes misturas asfálticas, como proposto por Santos *et. al.* (2018) e Ma, Zhang, Zhao e Wu (2019). Ainda no contexto de misturas asfálticas, Lima *et. al.* (2022) analisaram o ciclo de vida de pavimentos que receberam a adição de borracha proveniente de pneus.

Diante das possibilidades de aplicação da ACV, o presente trabalho visa realizar um estudo comparativo entre dois diferentes tipos de ligantes asfálticos: uma mistura composta por Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) do tipo 50/70 sem substituição e outra mistura com substituição parcial do CAP por polietileno de alta densidade (PEAD) reciclado, a fim de identificar e quantificar os impactos ambientais de ambas as misturas.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

Inicialmente, far-se-á a necessidade de definir os parâmetros mecânicos das misturas asfálticas a serem analisadas. Para tal, optou-se por trabalhar com uma mistura asfáltica do tipo Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ) sem substituição e/ou adições de polímeros e outra mistura do tipo CAUQ, porém, com substituição parcial do CAP por PEAD.

Para realizar a análise de ciclo de vida (ACV), fez-se a utilização do *Software* SimaPRO, que permite realizar estudos quantitativos acerca dos impactos ambientais de diversos materiais, entre os quais o CAP. Os dados utilizados para a elaboração do estudo para montagem dos inventários provêm do banco de dados Ecoinvent, que apresenta todos os parâmetros pertinentes ao estudo, tais como matérias-primas, transporte, bem como os quantitativos de impacto no meio ambiente.

### 2.2. Metodologia

#### 2.2.1. Preparo dos corpos de prova e ensaio Marshall

A metodologia para obtenção das misturas com e sem substituição são baseadas na norma DNIT 031/2006 – ES. Para o CAUQ sem substituição, o procedimento consiste no aquecimento dos agregados e ligantes, homogeneização, e conformação da mistura em um molde cilíndrico padronizado. A mistura de CAUQ com PEAD, inicia-se com a difusão do PEAD no ligante. Esse processo requer o aquecimento do ligante, seguido da adição gradual do PEAD garantindo sua difusão na matriz asfáltica. Este processo requer o aquecimento constante do ligante, na faixa de temperatura 160 °C. Após o processo de preparo do ligante com PEAD, segue-se os procedimentos prescritos na norma DNIT 031/2006 – ES. Os corpos de provas foram classificados em:

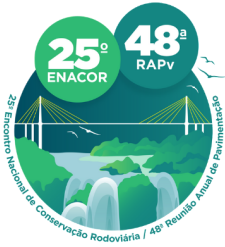
- P0 – CAUQ sem substituição por PEAD;
- P10 – CAUQ com substituição de 10% de PEAD;
- P20 – CAUQ com substituição de 20% de PEAD;
- P30 – CAUQ com substituição de 30% de PEAD.

Após o preparo dos corpos de provas, estes foram submetidos ao teste de estabilidade/fluência Marshall, a fim de verificar se houve ganho ou redução na resistência do CAUQ. O ensaio Marshall foi realizado em conformidade com a norma DNER 043/95 – ME. Conforme os parâmetros prescritos na norma DNIT 031/2006 – ES, o valor mínimo para estabilidade de um CAUQ é 4,90 kN. A tabela 01 apresenta os dados encontrados no Ensaio Marshall.

**Tabela 1:** Resultados do Ensaio Marshall para o CAUQ com e sem substituição por PEAD.

	DNIT 031/2006	P0	P10	P20	P30
Estabilidade (kN)	4,90	7,10	15,10	21,30	25,30
Fluência (mm)	-	2,80	5,90	8,90	10,00

Fonte: Os autores.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



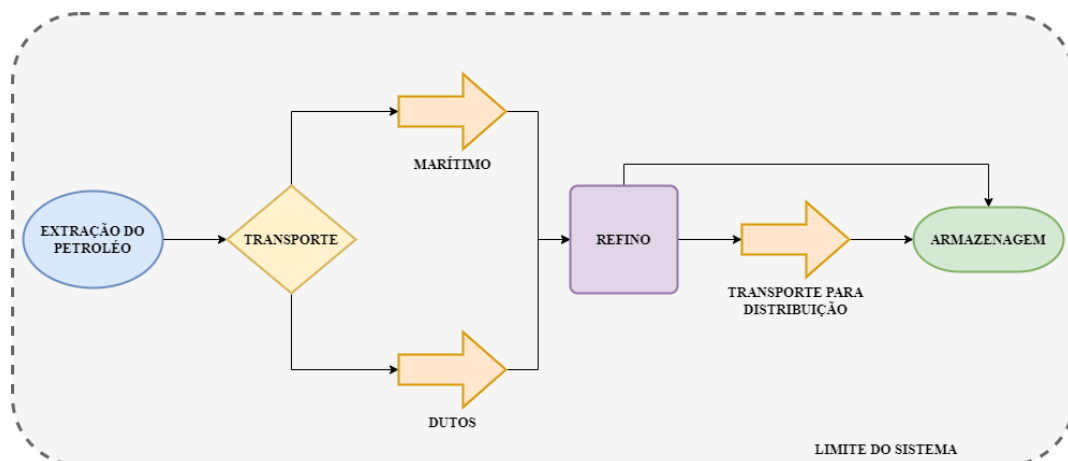
Com base nisso, pode-se dizer que todas as amostras testadas se encontram dentro dos limites toleráveis por parte da norma DNIT 031/2006 – ES. Os resultados do comportamento mecânico obtidos nesta fase, por Monteiro, Vieira e Kunert (2022), justificam a necessidade em quantificar o quão sustentável estes ligantes são no âmbito da ACV. Isso porque este é um dos testes que comprovam o potencial do comportamento mecânico da mistura CAP+PEAD, e que indicam necessidade de investigação quanto à viabilidade ambiental deste novo produto.

### 2.2.2. Avaliação do ciclo de vida ambiental

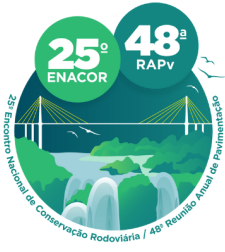
Nesta ACV buscou-se comparar o comportamento das categorias de impactos ambientais gerados pelos ligantes: CAP e CAP+PEAD. Essa tomada de decisão justifica-se por dois fatores (i) a única diferença, em termos de composição dos materiais no processo de dosagem, estão nos ligantes; (ii) o processo de preparação do ligante CAP+PEAD necessita de maior consumo energético, o que pode inviabilizar a aplicação, e/ou outros processos que possam estar embutidos na cadeia de produção do PEAD. Justificando assim, uma investigação específica quanto aos impactos ambientais dos ligantes, e uma investigação entre os respectivos processos. Além disso, a partir dos dados obtidos no ensaio anterior, nota-se o potencial do comportamento mecânico das misturas investigadas, o que justifica a investigação quantitativa da viabilidade ambiental destes ligantes.

As FIGURAS 01 e 02 representam as fronteiras dos sistemas analisados, do berço ao portão para a ACV ambiental comparativa. Sendo assim, a unidade funcional adotada foi 1 quilograma de ligante (CAP e CAP+PEAD). Definir as fronteiras do sistema, e demonstrar no fluxograma é fundamental para a realização do inventário e demais etapas da ACV.

**Figura 1:** Fluxograma representativo das etapas produtivas do CAP.



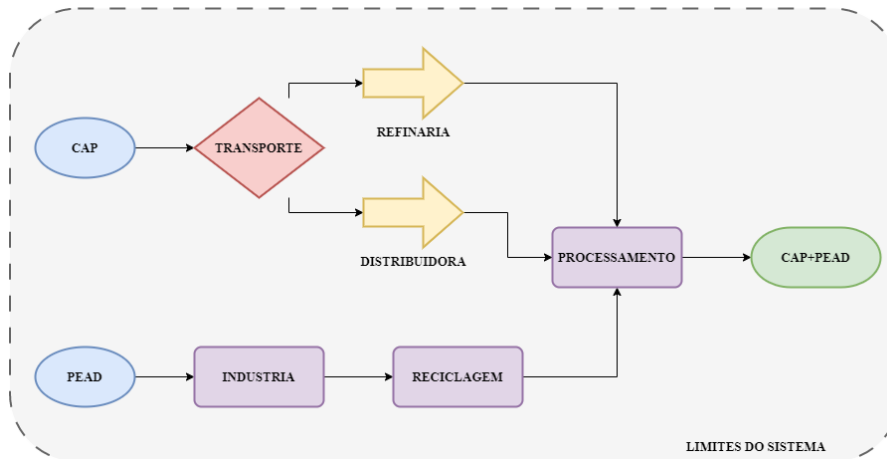
Fonte: Os autores.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR  
www.rapvenacor.com.br



Figura 2: Fluxograma representativo das etapas produtivas do CAP+PEAD.



Fonte: Os autores.

Para o inventário dos materiais e processos avaliados dos ligantes, foi utilizado o banco de dados ECOINVENT. Este banco de dados reúne informações acerca de diversos aspectos, entre os quais, impactos ao meio ambiente como emissões de gases de efeito estufa, eutrofização de corpos hídricos, ecotoxicidade, dentre outros. De posse dos dados do inventário, realizou-se a ACV por meio do *software* SimaPRO. As tabelas 01, 02 e 03 apresentam os quantitativos de material para se produzir 1kg de CAP, 1kg de PEAD e 1kg de CAP+PEAD, respectivamente.

Tabela 1: Quantitativo de materiais para 1kg de ligante asfáltico

Matéria-prima	CAP	CAP+PEAD
CAP (kg)	1,000	0,900
PEAD (kg)	0,000	0,100
Transporte – ferroviário (tkm)	0,0136	0,0136
Transporte – aquaviário (tkm)	0,001	0,001
Transporte – veículos leves (tkm)	0,0018	0,0018
Transporte – Caminhões (tkm)	0,0583	0,0583

GLO: Cimento Asfáltico de Petróleo – PEAD (hot). Database: Ecoinvent v. 5.3.1.

GLO: Bitumen adhesive compound (hot). Database: Ecoinvent v. 5.3.1.

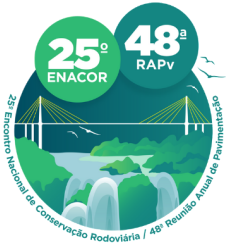
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Análise de Ciclo de Vida

Os dados provenientes da avaliação dos impactos ambientais foram estimados por meio da metodologia CML-IA, e são apresentados na tabela 02. É possível observar que o CAP 50/70 apresenta uma diferença considerável ao ser comparado com o CAP substituído.

De forma ampla, apenas em duas categorias o CAP substituído não se mostra benéfico, sendo estas a depleção abiótica e a depleção da camada de ozônio. Nas demais categorias, este





19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR  
www.rapvenacor.com.br



mesmo ligante se mostra vantajoso em comparação com um pavimento que utiliza apenas o CAP puro.

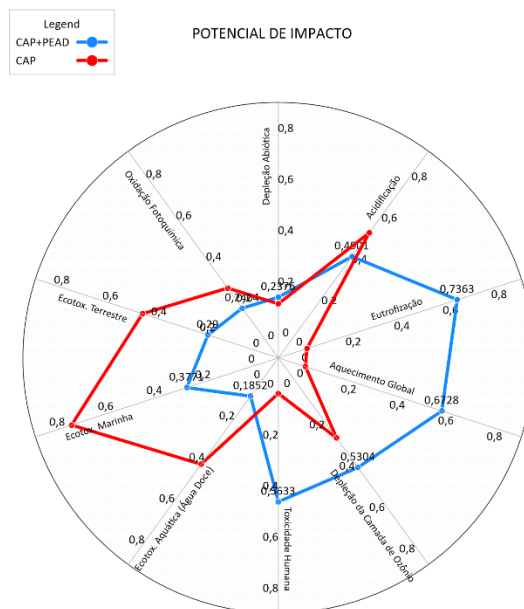
**Tabela 2:** Quantificação dos Impactos Ambientais da Mistura de CAP com PEAD e CAP Puro.

Cat. De Impacto	Unidade	CAP+PEAD	CAP
Depleção Abiótica	kg Sb eq	2,376380E-02	2,116629E-02
Acidificação	kg SO2 eq	4,901352E-03	6,051005E-03
Eutrofização	kg PO4--- eq	7,363154E-04	1,172113E-03
Aquecimento Global	kg CO2 eq	6,727937E-01	1,115121E+00
Depleção da Camada de Ozônio	kg CFC-11 eq	5,303743E-07	3,880217E-07
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	5,633391E-01	1,393722E+00
Ecotox. Aquática (Água Doce)	kg 1,4-DB eq	1,852056E-01	5,148183E-01
Ecotox. Marinha	kg 1,4-DB eq	3,770697E+02	8,512631E+02
Ecotox. Terrestre	kg 1,4-DB eq	2,900228E-03	5,590713E-03
Oxidação Fotoquímica	kg C2H4 eq	2,403535E-04	3,375723E-04

Fonte: Os autores.

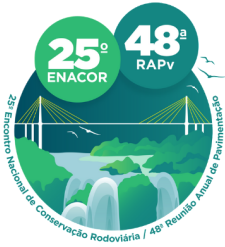
A figura 03 mostra as 10 categorias de impacto para o cenário avaliado, considerando 1 kg para cada material. Para simplificar a visualização dos impactos, foi utilizada uma escala variando de 0 a 1, sendo 0 o menor valor possível para um determinado impacto e 1 o maior valor do impacto avaliado.

**Figura 3:** Gráfico de potencial de impacto das categorias analisadas.



Fonte: Os autores.

Segundo um levantamento realizado pelo EuroBitumen, no ano de 2020, intitulado “The Eurobitume Life-Cycle Inventory for Bitumen”, a maior parte dos impactos decorrentes da produção



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



do CAP são decorrentes da própria cadeia produtiva do petróleo. Neste estudo, é demonstrado que, ao longo de todo o processo denominado do Berço ao Portão, a cadeia produtiva do petróleo tem um elevado potencial de impacto no meio ambiente, especialmente no que tange aos impactos atrelados a emissões atmosféricas (aquecimento global e depleção da camada de ozônio) e as emissões para água (ecotoxicidade marinha).

O impacto do CAP com PEAD na camada de ozônio pode ter alguma relação com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo das etapas produtivas, tanto do polímero em si, quanto do ligante. Pode-se observar na tabela anterior, que, durante a produção do ligante asfáltico há emissões de metano (CH<sub>4</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>). Esses dois gases, segundo Morales-Méndez e Silva-Rodríguez (2018) podem ter relações em ocasionar danos na camada de ozônio. Os autores também destacam que, durante a decomposição das sacolas, há emissões de CH<sub>4</sub> e etileno.

Essas emissões podem, de certa forma, afetar o fluxo de ozônio na atmosfera, uma vez que o aquecimento global tem o potencial de prover alterações na camada de ozônio e a depleção da camada de ozônio retroalimenta o processo de aquecimento. Além disso, o acúmulo de GEE pode impactar no fluxo de circulação do ozônio na atmosfera. Esse desbalanceamento pode também impactar na própria depleção da camada de ozônio. Além disso, essa alteração no fluxo pode fazer com que o ozônio seja encontrado em altitudes inferiores a 15km e, nesta situação, o gás pode ser considerado um poluente (CHIPPERFIELD *et. al.*, 2017; HERTZBERG, SIDONS e SCHREUDER, 2017; MORALES-MÉNDEZ E SILVA-RODRÍGUEZ, 2018).

Este ponto em comum entre aquecimento global e depleção da camada de ozônio se deve pelo fato de que os derivados de CFCs, HCFCs e outros apresentam um potencial de aquecimento global (GWP) muito mais elevado que o do CO<sub>2</sub> e, em muitos casos também podem ser encontrados na atmosfera por um longo período [*Lifetime*] (HANSEN, LACIS e PRATHER, 1989; KHALIL 1999; FLEMING *et. al.*, 2020).

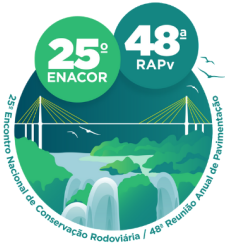
A depleção abiótica é uma categoria de impacto que está ligada com a extração de recursos, geralmente minerais e é representada pela equivalência de Antimônio (Sb) e com o uso de combustíveis fósseis (MJ) em um ciclo de vida (LIRA, 2017). No entanto, esse parâmetro é amplamente debatido, muito por conta da falta de uma plataforma que permita melhores práticas, na qual diferentes perspectivas sobre qual realmente é o problema do uso dos recursos abióticos. Além disso, é válido ressaltar a inexistência de um método considerado cientificamente correto sobre a depleção abiótica (GUINEÉ e HEIJUNGS, 1995; DRIELSMA *et. al.* 2016; VAN OERS, GUINEÉ e HEIJUNGS, 2019).

No contexto observado, a depleção abiótica pode ser decorrente de considerações acerca da cadeia produtiva do polímero, ou seja, levou-se em consideração o uso de recursos (muitos deles não renováveis) e energia para a produção do polímero. Por mais que se trate de um polímero de origem reciclada, é necessário ponderar que, até sua utilização como um substituto do ligante asfáltico, este poderá ter outras aplicações tais como: sacolas plásticas, filmes, embalagens, dentre outras.

#### 4. CONCLUSÃO

De certa forma, é possível inferir que o CAP com substituição por PEAD apresenta um fator de sustentabilidade maior quando comparado com o um ligante tradicional, uma vez que é possível otimizar o desempenho de um pavimento de forma geral.





19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

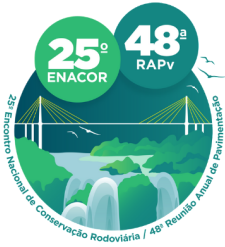
[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



Ademais, o uso de polímeros recicláveis na pavimentação permite destinar uma grande parte de polímeros plásticos que seriam encaminhados para depósitos de lixo (aterros) ou incinerados. Essa opção de destinação também permite encontrar uma alternativa de destinação de plásticos que possuem impeditivos para sua reciclagem.

## REFERÊNCIAS

- ALALOUL, Wesam Salah; ALTAF, Muhammad; MUSARAT, Muhammad Ali; JAVED, Muhammad Faisal; MOSAVI, Amir. Systematic Review of Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis for Pavement and a Case Study. *Sustainability*, [S.L.], v. 13, n. 8, p. 4377, 14 abr. 2021. MDPI AG.
- AYRES, R.U. 1995. *Life cycle analysis: A critique*. Resources, Conservation and Recycling, 14(3–4), pp.199–223.
- AZAPAGIC, A. PERDAN, S. CLIFT, R. 2004. *Sustainable development in practice: case studies for engineers and scientists*. Chichester, West Sussex, England; Hoboken, Nj: John Wiley & Sons.
- BAUMANN, H. TILLMAN, A-M. 2004. *The hitch hiker's guide to LCA: an orientation in life cycle assessment methodology and application*. Lund, Sweden: Studentlitteratur.
- CHIPPERFIELD, Martyn P.; BEKKI, Slimane; DHOMSE, Sandip; HARRIS, Neil R. P.; HASSLER, Birgit; HOSSAINI, Ryan; STEINBRECHT, Wolfgang; THIÉBLEMONT, Rémi; WEBER, Mark. Detecting recovery of the stratospheric ozone layer. *Nature*, [S.L.], v. 549, n. 7671, p. 211-218, 14 set. 2017. Springer Science and Business Media LLC.
- CIGU, Elena; AGHEORGHIESEI, Daniela Tatiana; (VATAMANU), Anca Florentina Gavriluță Gavriluță; TOADER, Elena. Transport Infrastructure Development, Public Performance and Long-Run Economic Growth: a case study for the eu-28 countries. *Sustainability*, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 67, 22 dez. 2018. MDPI AG.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas à quente - Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1994.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT ES 031/2006: Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico - Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2006
- DRIELSMA, Johannes A.; RUSSELL-VACCARI, Andrea J.; DRNEK, Thomas; BRADY, Tom; WEIHED, Pär; MISTRY, Mark; SIMBOR, Laia Perez. Mineral resources in life cycle impact assessment—defining the path forward. *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 85-105, 9 nov. 2015. Springer Science and Business Media LLC.
- EHRENFELD, J.R. 1997. *The Importance of LCAs—Warts and All*. Journal of Industrial Ecology, 1(2), pp.41–49.
- EUROBITME, The Eurobitume Life-Cycle Inventory for Bitumen, Version 3.1, European Bitumen Association, Brussels, Belgium, 2020.
- 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. 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. 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.
- FLEMING, E. L., NEWMAN, P. A., LIANG, Q., & DANIEL, J. S. (2020). The impact of continuing CFC-11 emissions on stratospheric ozone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD031849.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



GUINÉE, J.B. 2002. *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers.

GUINÉE, Jeroen B.; HEIJUNGS, Reinout. A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment. **Environmental Toxicology And Chemistry**, [S.L.], v. 14, n. 5, p. 917-925, maio 1995. Wiley.

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. 10.1016/0959-6526(93)90027-9

HASAN, Umair; WHYTE, Andrew; JASSMI, Hamad Al. Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates: recycled construction waste, reclaimed asphalt pavement, warm-mix asphalt and blast furnace slag use against traditional approach. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 257, p. 120531, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120531>.

HANSEN, James; LACIS, Andrew; PRATHER, Michael. Greenhouse Effect of Chlorofluorocarbons and Other Trace Gases. **Journal Of Geophysical Research**, Washington, Dc, v. 94, n. 13, p. 16417-16421, 20 nov. 1989.

HEIDARI, Mohammad Reza; HERAVI, Gholamreza; ESMAEELI, Asghar Nezhadpour. Integrating life-cycle assessment and life-cycle cost analysis to select sustainable pavement: a probabilistic model using managerial flexibilities. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 254, p. 120046, maio 2020. Elsevier BV.

HERTZBERG, Martin; SIDONS, Alan; SCHREUDER, Hans. Role of greenhouse gases in climate change. **Energy & Environment**, [S.L.], v. 28, n. 4, p. 530-539, 26 abr. 2017. SAGE Publications.

HOSSEINIJOU, 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.

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. 10.1016/j.jclepro.2008.06.005.

HUANG, Yue; BIRD, Roger; BELL, Margaret. A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 197-204, maio 2009. Elsevier BV.

ISO – International Organization for Standardization, 2006. *ISO 14040 – International standard. In: Environmental management – life cycle assessment – principles and framework*. ISO, Geneva, Switzerland

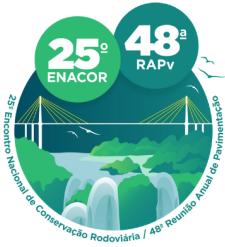
KHALIL, M. A. K. Non-CO2 Greenhouse Gases in The Atmosphere. **Annual Review Of Environment And Resources**, San Mateo, Ca, v. 24, n. 1, p. 645-661, dez. 1999.

KROZER, J. AND VIS, J.C. 1998. *How to get LCA in the right direction?* Journal of Cleaner Production, 6(1), pp.53–61.

LI, Jin; XIAO, Feipeng; ZHANG, Lanfang; AMIRKHANIAN, Serji N. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: a review. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 233, p. 1182-1206, out. 2019. Elsevier BV.

LIMA, Mayara Sarisariyama Siverio; MAKOUNDOU, Christina; SANGIORGI, Cesare; GSCHÖSSER, Florian. Life Cycle Assessment of Innovative Asphalt Mixtures Made with Crumb Rubber for Impact-Absorbing Pavements. **Sustainability**, [S.L.], v. 14, n. 22, p. 14798, 9 nov. 2022. MDPI AG.

LIRA, Júlia Santiago de Matos Monteiro. Depleção abiótica e potencial de aquecimento global no ciclo de vida de telhado verde comparativamente a um telhado convencional. 2017.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



MA, Hui; ZHANG, Zhigang; ZHAO, Xia; WU, Shuang. A Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Warm Mix Asphalt (WMA) and Hot Mix Asphalt (HMA) Pavement: a case study in china. **Advances In Civil Engineering**, [S.L.], v. 2019, p. 1-12, 9 set. 2019. Hindawi Limited.

MONTEIRO, D. S.; VIEIRA, G. A.; KUNERT, R. F. Avaliação do Efeito da Adição de Sacolas Plásticas de Polietileno de Alta Densidade, nas Propriedades do Ligante Asfáltico 50/70 para Fins de Pavimentação. In: 24º ENACOR - Encontro Nacional de Conservação Rodoviária e 47ª RAPV - Reunião Anual de Pavimentação, 2022, Bento Gonçalves. Anais do Congresso, 2022. v. Único. p. 653-664.

MORALES-MÉNDEZ, Jonathan-David; SILVA-RODRÍGUEZ, Ramón. Environmental assessment of ozone layer depletion due to the manufacture of plastic bags. **Heliyon**, v. 4, n. 12, p. e01020, 2018.

NILSSON, M. 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.

ORETO, Cristina; RUSSO, Francesca; VEROPALUMBO, Rosa; VISCIONE, Nunzio; BIANCARDO, Salvatore Antonio; DELL'ACQUA, Gianluca. Life Cycle Assessment of Sustainable Asphalt Pavement Solutions Involving Recycled Aggregates and Polymers. **Materials**, [S.L.], v. 14, n. 14, p. 3867, 11 jul. 2021. MDPI AG.

SANTERO, N.J. AND HORVATH, A. 2009. *Global warming potential of pavements*. *Environmental Research Letters*, 4(3), p.034011. 10.1088/1748-9326/4/3/034011.

SANTOS, Joao; BRESSI, Sara; CEREZO, Véronique; LOPRESTI, Davide; DAUVERGNE, Michel. Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: a comparative analysis. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 138, p. 283-297, nov. 2018. Elsevier BV.

SHI, Xijun; MUKHOPADHYAY, Anol; ZOLLINGER, Dan; GRASLEY, Zachary. Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 225, p. 414-425, jul. 2019. Elsevier BV.

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.

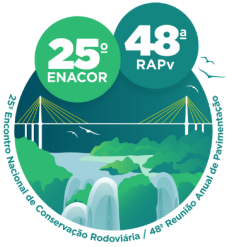
VAN OERS, Laurant; GUINÉE, Jeroen B.; HEIJUNGS, Reinout. Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited—updating ultimate reserve estimates and introducing time series for production data. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 294-308, 16 out. 2019. Springer Science and Business Media LLC.

VAN OERS, L., GUINÉE, J.B., HEIJUNGS, R. *et al.* Top-down characterization of resource use in LCA: from problem definition of resource use to operational characterization factors for dissipation of elements to the environment. *Int J Life Cycle Assess* **25**, 2255–2273 (2020).

VIEIRA, Gledsa Alves; KUNERT, Rafael Ferreira. Evaluation of the life cycle and the use of recyclable materials in paving. **International Journal Of Geoscience, Engineering And Technology**, Teófilo Otoni, v. 2, n. 1, p. 92-101, nov. 2020.

WCED - World Commission on Environment and Development. 1987. *Our common future*. Oxford University Press, Oxford.

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(1), pp.6–6.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



YU, Bin; LU, Qing. Life cycle assessment of pavement: methodology and case study. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S.L.], v. 17, n. 5, p. 380-388, jul. 2012. Elsevier BV.

---