

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/671

# Comparação do Desempenho Ambiental de Pavimentos Asfálticos: AAUQ com Adição de Polietileno Tereftalato Reciclado e CBUQ Convencional

Ivana Jesus Cavalcante

Engenheira Civil, Universidade de Brasília, Brasília DF, Brasil, ivanacavalcante99@gmail.com

Mario Rene Rivera Osorto

MSc. Em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília DF, Brasil, marior.riverao@outlook.com

Michéle Dal Toé Casagrande

Professora Titular, Universidade de Brasília, Brasília DF, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

**RESUMO:** A mistura asfáltica conhecida como Areia Asfalto Usinado a Quente (AAUQ) é comumente empregada como revestimento em rodovias com baixo volume de tráfego e com escassez de agregado graúdo. No entanto, essas misturas podem apresentar menor resistência às deformações permanentes quando comparadas a outras misturas usinadas a quente. Alternativas de incorporação de Polietileno Tereftalato Reciclado (RPET) nas misturas asfálticas em substituição do agregado miúdo e filler foram estudadas para melhorar o desempenho mecânico e ambiental. No presente estudo são apresentados os resultados da abordagem probabilística da Avaliação de Ciclo de Vida de duas alternativas de pavimentação no Brasil, e a inclusão de uma nova tecnologia como a inclusão de Polietileno Tereftalato Reciclado na matriz da mistura de Areia Asfalto Usinada a Quente como substituto parcial do agregado miúdo e substituto total do filler. Foram testadas 3 unidades funcionais de 1 quilômetro de rodovia de duas faixas (7 metros de largura), com a metodologia de avaliação de impactos ReCiPe e aplicando uma abordagem probabilística utilizando o cálculo MonteCarlo por meio do software OpenLCA. Os resultados respaldam a viabilidade de uso do RPET para misturas asfálticas como substituição de agregado miúdo e filler com melhoras no desempenho mecânico e ambiental.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimentação, Sustentabilidade, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), AAUQ, PET.

**ABSTRACT:** The asphalt mixture known as Hot Machined Asphalt Sand (AAUQ) is commonly employed as a coating on highways with low traffic volume and a shortage of coarse aggregate. However, these mixtures may have lower resistance to permanent deformation when compared to other hot-machined mixtures. Alternatives for the incorporation of Recycled Polyethylene Terephthalate (RPET) in asphalt mixtures to replace fine aggregate and filler were studied to improve their mechanical and environmental performance. In the present study, the results of the probabilistic approach of the Life Cycle Assessment of two paving alternatives in Brazil are presented, and the inclusion of a new technology such as the inclusion of Recycled Polyethylene Terephthalate in the matrix of the Hot Machined Asphalt Sand mixture as a partial substitute of the fine aggregate and total substitute of the filler. 3 functional units of 1 kilometer of two-lane highway (7 meters wide) were tested, with the ReCiPe impact assessment methodology and applying a probabilistic approach through the MonteCarlo calculation using the OpenLCA software. The results support the feasibility of using RPET for asphalt mixtures as a substitute for fine aggregate and filler with improvements in mechanical and environmental performance.

**KEYWORDS:** Paving, Sustainability, Life Cycle Assessment, Sand-asphalt hot mix, PET.

## 1 INTRODUÇÃO

Devido às suas grandes extensões e alto consumo de recursos, os pavimentos rodoviários são foco de pesquisadores que procuram o desenvolvimento de alternativas de projetos de misturas asfálticas com materiais alternativos, sendo estes sustentáveis no uso de recursos naturais, mas também vislumbrando a melhora de parâmetros mecânicos e de durabilidade das misturas, para minimizar a manutenção e garantir o

custo-benefício a longo prazo. Foram desenvolvidas pesquisas sobre as mudanças no comportamento mecânico da mistura asfáltica do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) com a adição de Polietileno Tereftalato (PET) micronizado, como substituto parcial da areia natural, obtendo resultados promissores, tanto na melhoria dos parâmetros de resistência mecânica, bem como no potencial de impacto ambiental, tanto na reciclagem dos resíduos de garrafas PET, quanto na otimização do consumo de recursos em pavimentos asfálticos. A presente pesquisa foi desenvolvida utilizando a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), mesma que se encontra definida pelas normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009 da Organização Internacional de Normalização, adequadas para o mercado brasileiro, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Tecnologias de Pavimentação com Materiais Alternativos e Avaliação de Ciclo de Vida

Os impactos ambientais mais significativos das misturas asfálticas usinadas a quente são o consumo de recursos naturais, potencial de aquecimento global a partir da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e o impacto no consumo energético, devido ao aquecimento dos agregados até a temperatura de trabalho da mistura. (Krau et al., 2021). Dentro das misturas asfálticas tem duas formas de inserir o PET a fim de alterar as características mecânicas ou como material alternativo: como modificante do ligante e como substituto do agregado miúdo, encontrando-se um maior potencial de utilização do PET neste formato devido a resultados positivos na caracterização mecânica, além de reduzir o teor de agregado miúdo na mistura.

Brito (2020) estudou a inserção de PET em forma micronizada como substituto do agregado miúdo em misturas asfálticas do tipo areia asfalto usinada a quente (AAUQ), avaliando o comportamento mecânico variando o teor de PET na mistura. De forma geral, a utilização de PET propiciou uma melhora no comportamento mecânico, uma diminuição no teor ótimo de ligante asfáltico para a mistura (AAUQ) devido a uma menor absorção de ligante pelas partículas de PET em contraste com as partículas da areia estudada, além de mudanças nos parâmetros volumétricos, massa específica aparente da mistura, estabilidade e rigidez, e outros parâmetros mecânicos estudados durante a caracterização laboratorial da pesquisa.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Brasileiras (ABNT) através das normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida. Assim, a ACV é uma dentre as várias técnicas de gestão ambiental, além da avaliação de risco, avaliação de desempenho ambiental, auditoria ambiental e avaliação de impacto ambiental. Em uma ACV, a fronteira é definida pelos estágios de vida de um produto específico compreendido dentro de uma unidade funcional, quantificando seu desempenho. Entretanto, em uma avaliação de impacto ambiental, a fronteira está definida pelos estágios de vida de um projeto numa localidade específica, sendo esta última característica da localização a de maior importância para a avaliação da magnitude e impacto das atividades no meio ambiente.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Definição do escopo

#### 3.1.1 Limites do sistema

Os limites são definidos em função das dimensões temporais e espaciais. O limite temporal contempla as etapas de produção da matéria prima, processamento e usinagem dos materiais, transporte até o local de instalação e construção do pavimento. Não contempla as etapas de operação e manutenção dos pavimentos. Para o presente estudo, o limite espacial considerou-se o local de instalação do pavimento o Distrito Federal, estabelecendo distâncias padrão para transporte dos materiais e instalação. Contudo, o foco do estudo foi definido da forma que o local de instalação não afete o resultado, só considerando como parâmetro geral que o pavimento é no Brasil.

#### 3.1.2 Unidade Funcional

A unidade funcional consiste em 1 km de rodovia de 2 faixas (7 m de largura) de pavimento de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) como revestimento, em comparação com um pavimento de AAUQ com Polietileno Tereftalato reciclado como substituto do filler

(agregado miúdo e a cal hidratada). Os pavimentos contam com base e sub-base, e foi considerado uma variação uniforme das espessuras das 3 camadas em função da espessura mínima e máxima estabelecidas na literatura para pavimentos asfálticos. Além disso, considerou-se a regularização do subleito. Na Figura 1 são apresentadas as espessuras mínimas e máximas, em milímetros, de cada uma das camadas dos pavimentos da Unidade Funcional.

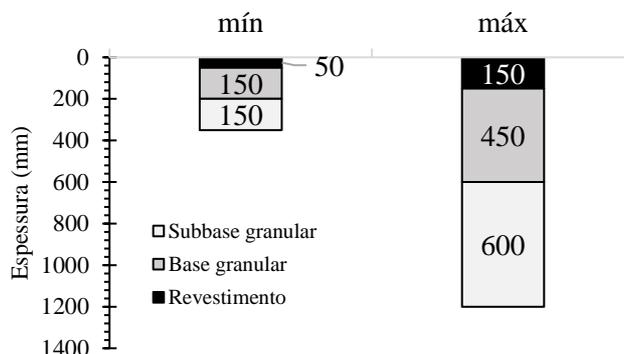


Figura 1. Seção variável de pavimento (CBUQ e AAUQ)

### 3.2 Inventário de Ciclo de Vida

Os dados primários correspondentes da mistura AAUQ com RPET micronizado são referentes aos resultados obtidos na pesquisa de Brito (2020). As quantidades e dados primários para as misturas convencionais são extraídas do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do Departamento de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em termos de consumo de materiais, rendimentos de equipamentos e consumo energético. Os dados secundários complementares aos dados primários são obtidos a partir da base de dados do inventário de ciclo de vida Ecoinvent 3.9.1. Os dados primários e secundários são gerenciados pelo software OpenLCA. Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os inventários de processos considerados para cada uma das camadas dos pavimentos das unidades funcionais.

Tabela 1. Inventário de processos - Revestimento CBUQ Convencional

Produto	Qtd	Und	Distribuição	Min	Max	$\bar{x}$
Areia	859.29	kg				
Brita graduada	681.95	kg				
Concreto Asfáltico (CAP)	63.00	kg	Triangular	45	90	63.23
Cal	56.20	kg				
Diesel, queimado em máquina de construção	13.19	MJ				
Calor, distrital ou industrial, exceto gás natural	9.83	MJ				
Óleo pesado	5.60	kg				
Transporte, frete, caminhão 7,5-16 toneladas métricas, EURO3	4.40	t*km				
Operação da máquina, diesel, >= 74,57 kW, alto fator de carga	3.30E-04	d				

Tabela 2. Inventário de processos - Revestimento AAUQ Convencional e +RPET

Produto	Qtd	Und	Distribuição	Min	Max	$\bar{x}$
Areia	900.00	kg	Triangular	780	850	800
Polietileno Tereftalato a partir da reciclagem do PET	100.00	kg	Triangular	50	120	100
Concreto Asfáltico (CAP)	100.00	kg	Triangular	60	120	100
Cal	100.00	kg				
Diesel, queimado em máquina de construção	13.19	MJ				
Calor, distrital ou industrial, exceto gás natural	9.83	MJ				
Óleo pesado	5.60	kg				
Transporte, frete, caminhão 7,5-16 toneladas métricas, EURO3	4.40	t*km				
Operação da máquina, diesel, >= 74,57 kW, alto fator de carga	3.30E-04	d				

### 3.3 Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida e Abordagem Probabilística

A metodologia de avaliação de impactos de ciclo de vida escolhida é a metodologia ReCiPe2016, desenvolvida no ano 2008 e atualizada no ano 2016, com representatividade global e categorias de impacto *midpoint* e *endpoint*, a qual categoriza as emissões e extração de recursos dentro de categorias de impactos ambientais, sociais ou econômicos por meio de fatores de caracterização. (Huijbregts et al., 2017). As categorias de impacto utilizadas para o presente estudo são detalhadas da Tabela 6.

Tabela 6. Categorias de Impacto escolhidas do ReCiPe – midpoint

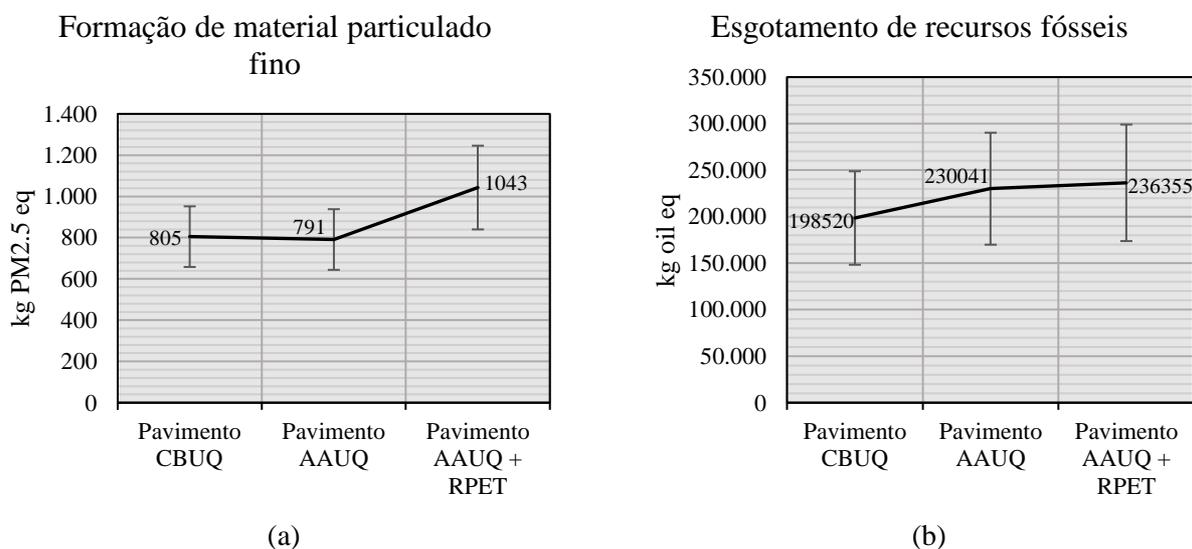
<b>Categoria</b>	<b>Unidade</b>
Potencial de Aquecimento Global	kg CO2-Eq
Recursos energéticos: não renováveis, fósseis	kg oil-Eq
Recursos materiais: metais/minerais	kg Cu-Eq
Formação de material particulado	kg PM2.5-Eq

Com o intuito de explorar uma fração de dados, foram escolhidas variáveis probabilísticas para os processos mais significativos das unidades funcionais, como a quantidade de asfalto, quantidade de RPET e filler, por meio de distribuições triangulares, estabelecendo valores máximos, mínimos e média para cada conceito. Além disso, foram estabelecidas distribuições uniformes para as espessuras das camadas de cada um dos pavimentos das unidades funcionais, a partir da espessura máxima e mínima de cada camada. A partir da definição das variáveis probabilísticas, foi utilizado o módulo de abordagem probabilística do software OpenLCA por meio do método de cálculo MonteCarlo, estabelecendo 1,000 rodadas para cada unidade funcional. A partir desse cálculo probabilístico, foram obtidos histogramas e estatísticas de cada categoria de impacto.

## 4 RESULTADOS

A partir da abordagem probabilística da Avaliação de Ciclo de Vida, são apresentados os resultados para 1 km de rodovia de 7 metros de largura, ou 7,000 m<sup>2</sup> para cada unidade funcional de pavimento. Os resultados são representados na Figura 2 com o gráfico da média e  $\pm$  desvio padrão para cada uma das categorias de impacto.

As categorias de formação de material particulado, expressado em kg de partículas suspensas no ar de 2.5 micras (PM2.5) equivalentes; esgotamento de recursos fósseis, expressado em kg de petróleo equivalentes; potencial de aquecimento global e mudanças climáticas, expressado em kg de dióxido de carbono equivalentes; e esgotamento de recursos minerais, expressado em kg de cobre equivalentes.



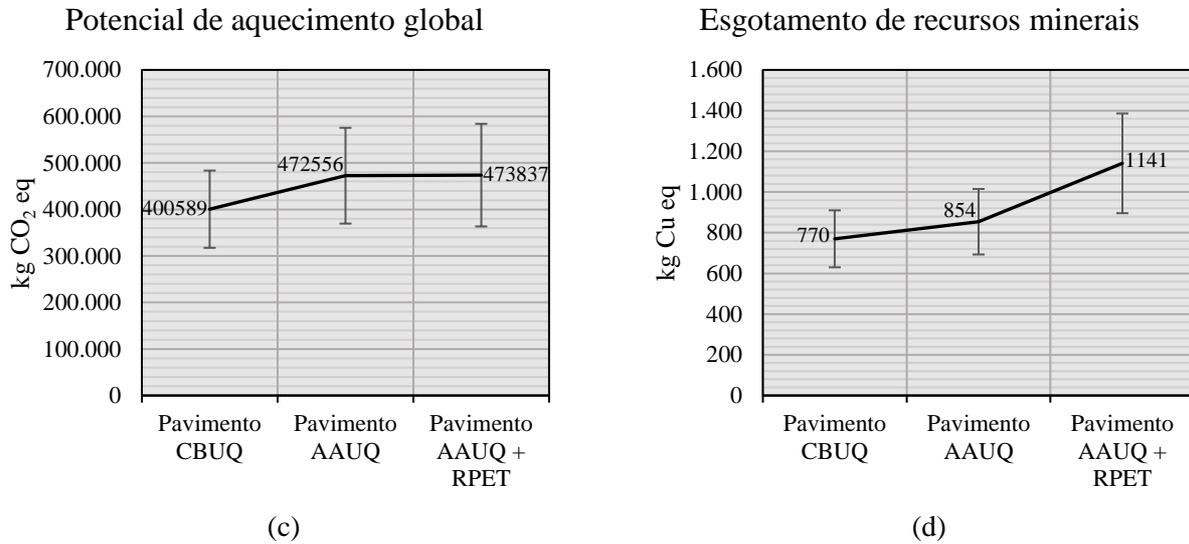


Figura 2. Resultados de Avaliação de impactos das categorias: (a) Formação de material particulado fino; (b) Esgotamento de recursos fósseis; (c) Potencial de aquecimento global; (d) Esgotamento de recursos minerais.

A partir da estatística de cada categoria de impacto desde a abordagem probabilística, foram plotadas funções de densidade de probabilidade a começar das distribuições Gaussianas para cada categoria de impacto e cada unidade funcional, com o intuito de comparar o desempenho ambiental dos pavimentos nas condições de variabilidade estabelecidas no modelo. As diferentes curvas de distribuição resultantes para as categorias de impacto de cada unidade funcional são apresentadas nas Figuras 3 a 6 e os parâmetros para a obtenção dessas curvas estão nas Tabelas 7 a 10.

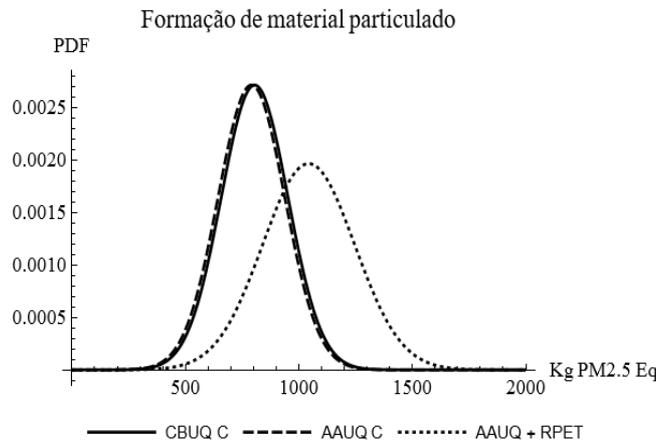


Figura 3. Curvas de densidade de probabilidade e estatística das unidades funcionais para a categoria: Formação de material particulado fino

Tabela 7. Parâmetros para a curva de densidade de probabilidade e estatística para a categoria: Formação de material particulado fino

UF	$\bar{x}$	min.	máx.	$\bar{\sigma}$	CV
Pavimento CBUQ	805	420	1162	147	18%
Pavimento AAUQ	791	392	1155	147	19%
Pavimento AAUQ + RPET	1043	546	1652	203	19%

Legenda:

UF representa a unidade funcional

$\bar{x}$  representa a média

$\bar{\sigma}$  representa o desvio padrão

CV representa o coeficiente de variação

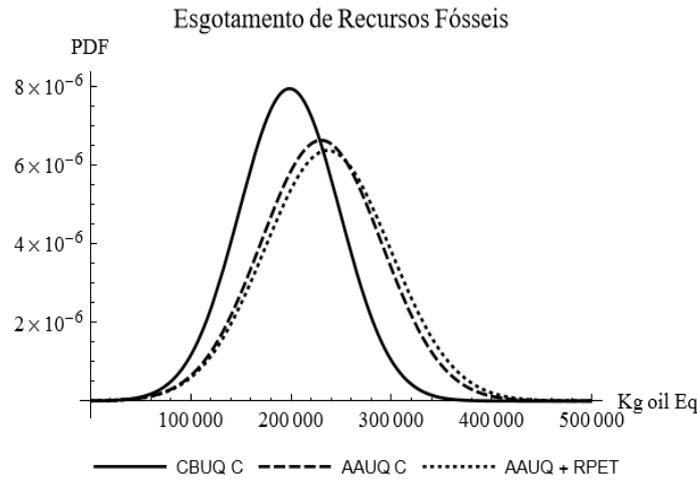


Figura 4. Curvas de densidade de probabilidade e estatística das unidades funcionais para a categoria: Esgotamento de recursos fósseis

Tabela 8. Parâmetros para a curva de densidade de probabilidade e estatística para a categoria: Esgotamento de recursos fósseis

UF	$\bar{x}$	min	máx.	$\bar{\sigma}$	CV
Pavimento CBUQ	198,520	96,971	329,700	50,246	25%
Pavimento AAUQ	230,041	109,284	384,321	60,193	26%
Pavimento AAUQ + RPET	236,355	111,678	389,620	62,643	27%

Legenda:  
 UF representa a unidade funcional  
 $\bar{x}$  representa a média  
 $\bar{\sigma}$  representa o desvio padrão  
 CV representa o coeficiente de variação

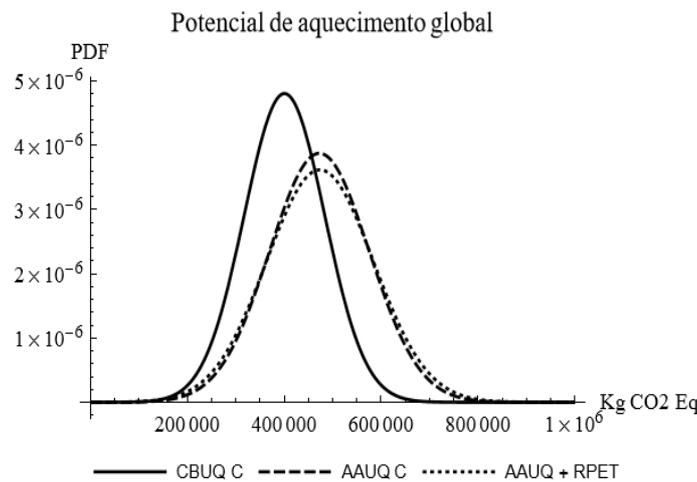


Figura 5. Curvas de densidade de probabilidade e estatística das unidades funcionais para a categoria: Potencial de aquecimento global

Tabela 9. Parâmetros para a curva de densidade de probabilidade e estatística para a categoria:  
 Potencial de aquecimento global

UF	$\bar{x}$	min	máx.	$\bar{\sigma}$	CV
Pavimento CBUQ	400,589	208,425	596,456	83,048	21%
Pavimento AAUQ	472,556	242,067	701,400	102,984	22%
Pavimento AAUQ + RPET	473,837	219,240	776,300	110,306	23%

Legenda:

UF representa a unidade funcional

$\bar{x}$  representa a média

$\bar{\sigma}$  representa o desvio padrão

CV representa o coeficiente de variação

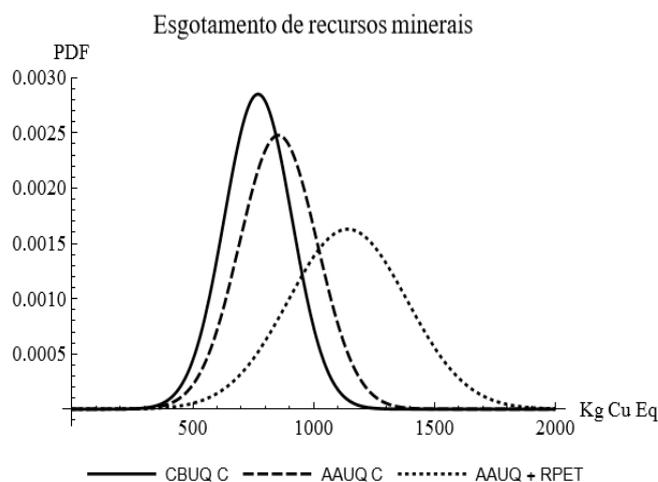


Figura 6. Curvas de densidade de probabilidade e estatística das unidades funcionais para a categoria:  
 Esgotamento de recursos minerais

Tabela 10. Parâmetros para a curva de densidade de probabilidade e estatística para a categoria:  
 Esgotamento de recursos minerais

UF	$\bar{x}$	min	máx.	$\bar{\sigma}$	CV
Pavimento CBUQ	770	406	1134	140	18%
Pavimento AAUQ	854	427	1253	161	19%
Pavimento AAUQ + RPET	1141	553	1848	245	21%

Legenda:

UF representa a unidade funcional

$\bar{x}$  representa a média

$\bar{\sigma}$  representa o desvio padrão

CV representa o coeficiente de variação

Na categoria de formação de material particulado fino, os pavimentos de CBUQ e AAUQ convencional apresentaram uma densidade de probabilidade semelhante. No entanto, o pavimento AAUQ com RPET apresentou uma distribuição deslocada com maior impacto e maior desvio padrão, representada pela Figura 3.

Em Esgotamento de Recursos Fósseis, o pavimento de CBUQ apresentou um impacto ligeiramente menor, devido a um menor teor de asfalto nesse tipo de mistura em comparação com o AAUQ (convencional e +RPET), que apresentaram resultados muito semelhantes. Na categoria de potencial de aquecimento global e mudanças climáticas, os resultados foram semelhantes ao esgotamento de recursos fósseis, com um melhor desempenho ambiental do CBUQ em contraste com os pavimentos de AAUQ, que obtiveram resultados semelhantes. Se destaca que a presença do RPET não representou mudança significativa do impacto ao substituir o filler de cal e areia, e ao reduzir o teor de asfalto ótimo da mistura. A categoria de esgotamento de

recursos minerais apresentou o maior deslocamento das curvas, com o pavimento com AAUQ + RPET demonstrando maior impacto e o pavimento com CBUQ o menor.

Além das observações apresentadas, é destacada a sobreposição das curvas de densidade de probabilidade das unidades funcionais para todas as categorias de impactos para as unidades. Isso indica um desempenho ambiental geral muito semelhante entre ambas as tecnologias, e demonstra que o acréscimo do RPET não representa um detrimento ambiental, mas representa um potencial de pavimentos sustentáveis com melhorias no desempenho mecânico, redução do teor ótimo de ligante, substituição de materiais com uma alta pegada ambiental como a cal hidratada, e maiores vidas úteis.

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, são descritas as seguintes conclusões.

Foram geradas estatísticas dos impactos ambientais considerados para os pavimentos asfálticos das misturas CBUQ e AAUQ, a partir de dados primários de alta qualidade a partir de pesquisas e do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), integrando variáveis probabilísticas para o teor de asfalto, teor de RPET, e uma variabilidade uniforme das espessuras das camadas para diferentes condições de tráfego hipotético.

Os pavimentos com mistura de Concreto Betuminoso Usinado a Quente obtiveram menores valores globais nas categorias de impactos estudadas, sendo a hipótese que ditas misturas ao ter agregados graúdos, geralmente requerem menor teor de asfalto para atingir os critérios de projeto, em contraste com as misturas de Areia Asfalto Usinada a Quente, que são usadas em regiões com escassez de jazidas de agregados graúdos.

O acréscimo do PET Reciclado na matriz do AAUQ não apresentou efeitos negativos nos impactos ambientais mais relevantes como potencial de aquecimento global e esgotamento de recursos fósseis. Contudo, apresentou um detrimento do desempenho ambiental das categorias de formação de material particulado fino e esgotamento de recursos minerais.

Entretanto, é destacada que a grande vantagem do cálculo probabilístico é identificar a possibilidade de ter melhor desempenho ambiental das novas tecnologias sobre as convencionais em certas condições, a partir da sobreposição das curvas de densidade de probabilidade das unidades funcionais para todas as categorias de impactos. Além disso, apresenta uma faixa de resultados das categorias de impacto analisadas que permitem uma discussão sobre os impactos ambientais das tecnologias de pavimentação atual e rompem paradigmas sobre o uso de materiais não convencionais, demonstrando uma viabilidade de uso sem detrimentos no desempenho ambiental atual, com melhoras no desempenho mecânico e maior durabilidade.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, da Universidade de Brasília (PPGG/UnB), ao Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos NGM/UnB, ao CNPq, CAPES e FAP/DF na colaboração e suporte.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR ISO 14040. *Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR ISO 14044. *Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro.
- Brito, G. Q. (2020). *Desempenho de mistura asfáltica do tipo Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) com a inserção de PET (Polietileno Tereftalato) micronizado*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 69p.
- Huijbregts, M. A. J. et al. (2017). *ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level*. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* v. 22, p. 138–147.
- Krau, M. M. T. et al. (2021). *Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na Pavimentação Asfáltica: Uma Revisão Sistemática da Literatura*. In: *35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*, p.612-623.