

## UTILIZAÇÃO DO CAP BORRACHA COMO MATERIAL POTENCIAL DE AMPLIAÇÃO DE DURABILIDADE E FLEXIBILIDADE DO PAVIMENTO

MORAES, Lucas<sup>1</sup>

REGO, Julian O. S. S.<sup>2</sup>

Prof. Me. MAGDALENA, Rafael A. V. C.<sup>3</sup>

Universidade São Francisco

[lg.moraes2@gmail.com](mailto:lg.moraes2@gmail.com)

[julian.oliveira1107@hotmail.com](mailto:julian.oliveira1107@hotmail.com)

<sup>1</sup>Lucas de Moraes, Aluno do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista-SP

<sup>2</sup>Julian Oliveira Silva de Souza Rego, Aluna do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista-SP

Professor Orientador Rafael Augusto Valentin da Cruz Magdalena, Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista-SP

**Resumo:** Este estudo tem como propósito investigar e avaliar a aplicação inovadora do Cimento Asfáltico de Petróleo com Borracha (AB8) como um material de vanguarda destinado a aprimorar a durabilidade, flexibilidade e eficiência dos pavimentos rodoviários. O foco abrange não apenas as melhorias técnicas, mas também a abordagem ambiental e social, particularmente relacionada à problemática do descarte inadequado de pneus no contexto brasileiro. A pesquisa se estenderá para analisar o impacto do uso do AB8 na resistência ao desgaste, capacidade de absorção de impactos e na redução de ruído, oferecendo uma perspectiva abrangente sobre suas vantagens. Além disso, este estudo pretende aprofundar a análise da viabilidade técnica do uso do CAP Borracha, com um enfoque crítico na avaliação do desempenho em pavimentos existentes, abordando tanto a sua eficácia quanto a sua durabilidade perante as condições reais de tráfego. Será igualmente examinado o impacto ambiental dessa inovação, especialmente no que diz respeito à redução do desperdício de pneus e seus benefícios ecológicos. Por último, mas não menos importante, a pesquisa buscará estabelecer uma análise abrangente da viabilidade econômica da implementação do AB8 em comparação com soluções tradicionais, considerando tanto os custos iniciais quanto os custos de manutenção a longo prazo, visando fornecer um entendimento completo do seu potencial impacto na infraestrutura viária do Brasil.

**Palavras-chave:** Asfalto; Manutenção; Pavimentação; Pneu; Sustentabilidade;

### Introdução

Este estudo, de natureza bibliográfica e laboratorial, realiza uma comparação entre o uso do cimento asfáltico de petróleo (CAP) convencional e o CAP borracha (AB8), abordando a questão ambiental e social relacionada ao descarte inadequado de pneus no Brasil. O objetivo principal é demonstrar que a reutilização de pneus como modificador do ligante oferece não apenas vantagens econômicas, mas também contribui para a maior durabilidade e resistência das estradas pavimentadas. Nesse contexto, a aplicação do CAP Borracha desempenha um

papel fundamental como material flexível, proporcionando resultados eficazes na mitigação de problemas como buracos, ondulações, fissuras e trincas nas faixas de rodagem das rodovias.

De acordo com um estudo realizado pela Confederação Nacional do Transporte – CNT (2017), é evidente que o país utiliza abordagens desatualizadas no planejamento rodoviário, apresenta carências técnicas na execução, investimentos inadequados e falhas na gestão, fiscalização e manutenção das vias.

Este estudo ressalta que a metodologia de planejamento de rodovias no Brasil está defasada em quase quatro décadas em comparação com nações como Estados Unidos, Japão e Portugal. Além disso, a ausência de fiscalização resulta na entrega de obras que não atendem aos padrões de qualidade estabelecidos, o que acarreta gastos suplementares para correções. É importante mencionar também, que o problema do sobrepeso no transporte de cargas agrava ainda mais a situação. Embora a vida útil esperada para o pavimento asfáltico seja de 8 a 12 anos, problemas estruturais começam a surgir em um período notavelmente breve após a conclusão das rodovias, em alguns casos, apenas sete meses após a inauguração.

### *Contexto histórico da pavimentação no Brasil*

A história da pavimentação no Brasil, destaca a progressão e a urgência das melhorias nas estradas ao longo dos tempos. Segundo Bernucci et al (2008), uma das primeiras estradas construídas foi o caminho aberto, que ligava São Vicente ao Planalto Piratininga, em 1560, inicialmente de terra batida, demonstra as condições precárias enfrentadas por muitas estradas no país. Em sequência, durante seu mandato como presidente do Brasil de 1926 a 1930, Washington Luiz deixou um legado ao proclamar que "governar é abrir estradas", o que impulsionou a expansão das vias brasileiras, incluindo a construção da primeira rodovia totalmente pavimentada, a Rio-São Paulo, com extensão de 506 quilômetros. Em 1955, a Fábrica de Asfalto da Refinaria Presidente Bernardes da Petrobras entrou em operação, coincidindo com a implementação da indústria automobilística em 1956, no governo de Juscelino Kubitschek. Esse período viu a necessidade imperativa de expandir a rede rodoviária devido ao expressivo aumento na circulação de automóveis.

Para essa expansão, a pavimentação de rodovias passou a empregar o asfalto quente, também conhecido como concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Essa abordagem permite a utilização do cimento asfáltico de petróleo (CAP) em conjunto com agregados, bem como a adoção de ligantes modificados, visando conferir maior durabilidade, resistência

e redução na necessidade de manutenção às estradas. Além disso, essa prática ecoamigável inclui a reciclagem de pneus em conformidade com as diretrizes do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), resultando no asfalto de borracha, que, posteriormente, é incorporado ao ligante para promover uma abordagem sustentável na pavimentação rodoviária.

### *Pavimentação convencional*

Segundo (Bernucci et al., 2008, p.26)

“O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo. A baixa reatividade química a muitos agentes não evita que esse material possa sofrer, no entanto, um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água.”

Desta forma, tal combinação de agregados minerais, unidos pelo ligante asfáltico, confere ao asfalto convencional sua característica distintiva de resistência, durabilidade e capacidade de suportar cargas de tráfego.

### *Pavimentação com asfalto-borracha*

O asfalto de borracha é uma solução inovadora na construção de pavimentos que combina as propriedades do asfalto convencional com a versatilidade e a durabilidade da borracha. Produzido pela incorporação de grânulos de borracha reciclada de pneus usados no ligante asfáltico, esse material não apenas contribui para a redução do desperdício de pneus, promovendo a sustentabilidade, mas também oferece benefícios significativos em termos de desempenho.

### *Sustentabilidade*

Ao analisar a evolução tecnológica na construção civil, é inquestionável a lacuna no desenvolvimento e implementação de inovações em comparação a setores como telecomunicações e audiovisuais, por exemplo. Contudo, observa-se um princípio de transformação na abordagem dos novos pesquisadores, que agora direcionam seus esforços para a avaliação da viabilidade técnica e sustentável para os mais diversos tipos de desafios,

principalmente quando se trata do meio ambiente.

O avanço tecnológico, frequentemente, traz consigo soluções para problemas emergentes, e a crescente produção de veículos, por exemplo, resulta em um aumento correspondente na disponibilidade de pneus no mercado. Este processo cria um ciclo potencialmente perigoso, uma vez que a falta de infraestrutura apropriada para o descarte desses resíduos derivados do petróleo causa impactos ambientais significativos.

De acordo com Leite; Lima; Dini, (2022), com o passar do tempo, as cidades enfrentam crescentes desafios na gestão adequada do descarte dos resíduos gerados pela população, e a escassez de aterros é um problema colossal, então a reutilização da borracha de pneus, principalmente como ligante asfáltico, se configura como uma excelente alternativa em comparação ao descarte em aterros convencionais.

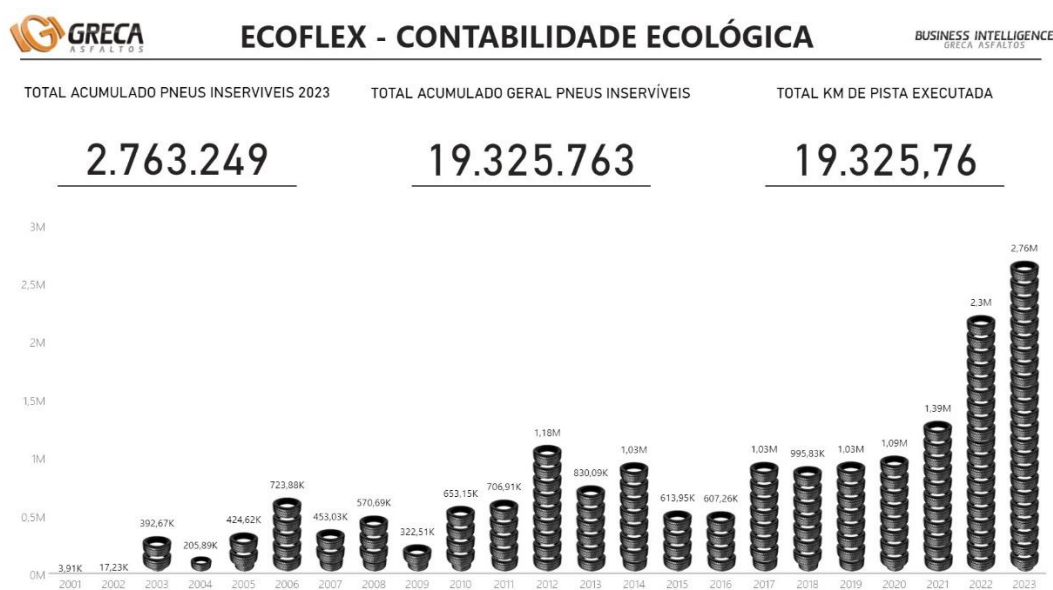
Em 1999, o CONAMA estabeleceu o primeiro regulamento para a destinação final de pneus descartados, apresentando procedimentos que introduziram uma abordagem reversa para enfrentar esse desafio. O setor empresarial responsável por essa logística tem como meta viabilizar a reutilização de componentes após o término de sua vida útil, por meio de processos manufaturados. Esse ciclo reverso desempenha um papel crucial na conservação do meio ambiente. No entanto, as dificuldades em implementar eficazmente as práticas estabelecidas no regulamento de 1999 têm contribuído para a morosidade em seu cumprimento. A luta persiste, buscando a colaboração entre as empresas fabricantes de pneus, prefeituras e organizações não governamentais (ONGs) dedicadas à preservação da natureza. Essas ações não se limitam apenas a essas instituições, considerando que a população, como a principal usuária, é a mais afetada pelo descarte inadequado.

### *Viabilidade técnica*

Conforme observado por Giulio, (2007), a inclusão de borracha em misturas asfálticas não apenas proporciona ganhos ambientais notáveis, absorvendo do ambiente cerca de mil pneus por quilômetro e reduzindo o descarte inadequado, mas também oferece vantagens consideráveis. Entre elas, destacam-se o prolongamento da vida útil do pavimento, o aumento da resistência ao desgaste e à fadiga, reduzindo, portanto, a necessidade de manutenção prematura, redução de ruídos, melhor aderência. Além disso, essa abordagem resulta em uma recuperação elástica mais eficaz, resistência ao envelhecimento precoce causado pela oxidação

do cimento asfáltico de petróleo, durabilidade perante as intempéries e uma maior capacidade de resistência a deformações plásticas, prevenindo a formação de sulcos indesejáveis.

Em 2000, após dois anos de pesquisas, investimentos e com a necessidade de respaldar cientificamente o asfalto-borracha, a Greca Asfaltos realizou um convênio de cooperação técnica com o Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, considerado referência nacional em pesquisas rodoviárias. A partir daí, surgiu a linha Ecoflex e após extensivos testes, foi inaugurado no Brasil, o primeiro trecho experimental pavimentado com asfalto borracha em agosto de 2001, localizado entre Guaíba e Camaquã, na BR-116/RS, km 319, concessionado pela Univias, marcou o início de uma nova era para as estradas do país. A empresa que está a 64 anos no mercado da pavimentação asfáltica é responsável pelo ligante Ecoflex, a qual utiliza em sua composição pó de borracha moída de pneus, e de acordo com a Figura 1, vem mostrando um número crescente de pneus retirados do ambiente anualmente.



**Figura 1:** Contabilidade ecológica da linha Ecoflex de 2001 a 2023. (Fonte: Greca Asfalto: Contabilidade ecológica – Asfalto-borracha, 2023).

Segundo Zatarin; Silva; Aneman; Barros; Chrisostomo, (2017), um estudo foi conduzido em Curitiba, focando em uma rua específica para comparar os resultados e o custo-benefício entre o asfalto convencional e o asfalto-borracha. Sendo selecionado 200 metros da via, onde 100 metros foi utilizado o CAP 50/70, tido como convencional e os outros 100 metros com a utilização do AB8, asfalto-borracha. A análise abrangeu desde os custos iniciais de execução até os custos de manutenção após um período de 7 anos desde a construção. Avaliando

diversos aspectos, incluindo investimentos, desempenho ao longo do tempo e os custos associados à manutenção.

Tendo em vista que os cálculos foram baseados em tabelas do ano vigente ao estudo, 2012, oferecidas pela Prefeitura de Curitiba e os custos de manutenção era o mesmo para ambos os asfaltos, foram levantados os seguintes dados:

- 1- Execução de pavimento em asfalto convencional com preparo de base: R\$ 46,66/m<sup>2</sup>
- 2- Execução de pavimento em asfalto-borracha com preparo de base: R\$ 77,22/m<sup>2</sup>
- 3- Manutenção: R\$ 67,30/m<sup>2</sup>



**Figura 2:** Gráfico comparativo do custo da execução para 100 metros de faixa com aproximadamente 7 metros de largura (Fonte: Sanches; Grandini; Junior, 2012).

Findando o prazo estimado para o estudo e após análise visual, foi possível perceber que 70% do trecho com o asfalto convencional precisou de manutenção, enquanto o trecho com o asfalto-borracha necessitou de reparo em apenas 10%. Sendo assim, tem-se os seguintes resultados:

- 1- Manutenção do asfalto-borracha:  $R\$67,30m^2 \times 0,10 = R\$ 6,73m^2$
- 2- Manutenção do asfalto convencional:  $R\$67,30m^2 \times 0,70 = R\$ 47,11m^2$



**Figura 3:** Gráfico comparativo do custo manutenção para 100 metros de faixa com aproximadamente 7 metros de largura (Fonte: Sanches; Grandini; Junior, 2012).

Conforme observado na figura 2, que apresenta o gráfico comparativo do custo de execução, a princípio, esse custo é maior do CAP Borracha em relação ao CAP convencional, porém, após o período mencionado, o asfalto-borracha apresentou uma necessidade significativamente menor de reparos em comparação com o asfalto convencional, influenciando o custo total e o benefício econômico da escolha do tipo de pavimentação.

Com base nos dados previamente mencionados, segue a descrição dos custos de execução dos revestimentos de CBUQ, levando em consideração cada tipo de asfalto, conforme detalhado na tabela.

GRANDEZAS	CÁLCULO	UNIDADE	TIPO DE ASFALTO		
			CAP CONVENCIONAL 50/70	ASFALTO BORRACHA (ECOFLEX)	
A	Quantidade de massa asfáltica CBUQ produzida	-	ton	26.250	18.375

B	Custo de Usinagem/Aplicação por tonelada de CBUQ aplicado	-	R\$/ton	200,00	230,00
C	Quantidade de massa x Custo de Usinagem/Aplicação	A x B	R\$	5.250.000,00	4.226.250,00
D	Teor de Asfalto	-	% peso	5%	5,5%
E	Custo de Asfalto por tonelada	-	R\$/ton	1.150,00	1.550,00
F	Custo Asfalto no CBUQ	A x D x E	R\$	1.509.375,00	1.566.468,75
G	Custo Total da Obra	C + F	R\$	<b>6.759.375,00</b>	<b>5.792.718,75</b>

**Figura 4:** Tabela comparativa revestimento CBUQ convencional x revestimento CBUQ com asfalto-borracha para produção de 30 km (Fonte: Zatarin; Silva; Aneman; Barros; Chrisostomo, 2017).

Destaca-se também, que o custo de execução do asfalto-borracha é mais elevado em comparação com o CBUQ convencional, pois há a necessidade de aumentar as temperaturas durante o processo de usinagem da mistura asfáltica, garantindo assim sua qualidade e durabilidade.

Essa majoração também abrange investimentos destinados a otimizar a eficiência na compactação do revestimento, visando resultados superiores em termos de desempenho e durabilidade da infraestrutura viária. Dessa forma, o asfalto-borracha não apenas reflete um diferencial de custo, mas também incorpora melhorias técnicas que contribuem para a longevidade e resistência do pavimento. Essa abordagem mais abrangente na análise dos custos não apenas considera a disparidade financeira, mas também destaca os benefícios a longo prazo em termos de desempenho estrutural, ressaltando a importância de uma visão integral na tomada de decisões sobre escolhas de materiais para pavimentação.

Segundo França (2023), um aspecto desfavorável reside no aumento da emissão de gases poluentes, que possuem potencial cancerígeno, representando riscos para a saúde humana. O intenso odor resultante da decomposição da borracha durante o processo de

modificação do CAP com borracha, assim como na aplicação do produto na pista, amplifica a emissão de fumaça devido ao uso de elevadas temperaturas na fabricação do asfalto modificado.

### *Análise do desempenho de teste em campo*

Segundo Silva; Coêlho, (2018), a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em busca de aprimoramentos e esclarecimentos, conduziu um ensaio sobre a deformação permanente de pavimentos, focalizando em misturas asfálticas modificadas por asfalto convencional e asfalto-borracha. Os resultados foram favoráveis ao uso do asfalto-borracha, evidenciando valores de deformação no simulador significativamente inferiores aos observados no asfalto convencional. Isso demonstrou uma menor suscetibilidade à formação de trilhas de roda.

Duas placas foram submetidas ao simulador de tráfego, sendo a placa da esquerda confeccionada com ligante convencional, deformando-se em 13% após 10.000 ciclos. Em contraste, a placa da direita, composta por asfalto-borracha, apresentou uma deformação de apenas 5% após 30.000 ciclos. A figura 5 ilustra as placas após a conclusão do simulador de tráfego.



**Figura 5:** Placa de CBUQ e asfalto-borracha após ensaio de simulação de tráfego (Fonte: Silva, 2018).

Ainda segundo Silva; Coêlho, (2018), o uso de asfalto-borracha oferece uma série de benefícios significativos. Esses incluem um aumento notável na flexibilidade do material, obtido através de uma destilação sustentável de pneus. Além disso, há vantagens econômicas, como a promoção de uma maior economia de combustível e um envelhecimento mais lento do pavimento. A maior viscosidade do asfalto-borracha contribui para uma maior capacidade de impermeabilização, enquanto sua composição proporciona mais aderência ao trafegar,

melhorando a capacidade de frenagem. A elasticidade aprimorada reduz o risco de aquaplanagem, e a substância demonstra menos sensibilidade a variações extremas de temperatura. Adicionalmente, o asfalto-borracha contribui para a redução do ruído entre o pneu e o pavimento, proporcionando uma solução eficaz que, ao mesmo tempo, permite a redução da espessura da pavimentação. Esses atributos destacam a versatilidade e as vantagens abrangentes do asfalto-borracha na melhoria das características e desempenho das vias.

## **Material e Métodos**

Neste estudo, adotamos uma abordagem ampla e integrada, que inclui uma pesquisa bibliográfica comparativa entre dois tipos de CAP - convencional e Borracha. Além disso, realizamos ensaios de laboratório alinhados com os princípios de sustentabilidade do projeto *Environmental, Social and Governance* – Meio Ambiente, Social e Governança (ESG) conduzido pela concessionária ARTERIS. Essa iniciativa ESG tem como foco a promoção da sustentabilidade em todos os aspectos do nosso estudo. Os ensaios de laboratório foram conduzidos em estrita conformidade com as diretrizes internas da empresa, com especial ênfase nas medidas rigorosas de controle de qualidade, garantindo, assim, a máxima precisão e confiabilidade dos resultados obtidos.

Conforme o documento oficial de projeto identificado sob a referência PROJETO-FD-BTS-SPV16,0-CDT033-2023, datado de 16 de outubro de 2023, para a BR 381, conhecida como Rodovia Fernão Dias, no segmento que abrange o trecho Belo Horizonte - São Paulo, tem como contratada responsável pela execução deste projeto a Usina Brita Sul e a Pedreira MBL – BRITA SUL e segue as especificações de referência a seguir:

- **ESPECIFICAÇÃO:** Particular para Execução de Concreto Asfáltico Usinado a Quente - CA - Designação ARTERIS ES 027- Rev. 019 (Julho/2021)
- Especificação Técnica para Projeto de Misturas Asfálticas a Quente ARTERIS-ET-027 : Tipo de Tráfego : Design ESALs (milhões) > 30
- Análise granulométrica de agregados finos e graúdos - designação ARTERIS T 27
- Massa específica e absorção de agregados finos - designação ARTERIS T 84
- Massa específica e absorção de agregados graúdos - designação ARTERIS T



- Partículas chatas, alongadas ou chatas e alongadas no agregado graúdo - designação ARTERIS D 4791
- Projeto volumétrico Superpave para misturas asfálticas a quente - designação ARTERIS ET 35
- Projeto volumétrico Superpave de mistura - designação ARTERIS ET 323
- Condicionamento de mistura asfáltica a quente (MAQ) - designação ARTERIS ET 30
- Massa específica aparente de misturas asfálticas compactadas usando amostras saturadas - superfície seca – designação ARTERIS T 166
- Massa específica teórica máxima e densidade de misturas asfálticas para pavimentação - designação ARTERIS T 209
- Porcentagem de vazios de misturas asfálticas densas e abertas compactadas - designação ARTERIS T 269
- Certificados do Centro de Desenvolvimento Tecnológico – CDT: CDT-909-2023 - CDT-910-2023 - 0 - CDT-911-2023

O tipo de ligante utilizado foi o CAP Borracha ECOFLEX B, da Greca Asfaltos e a brita 1, pedrisco e pó de pedra da Pedreira MBL. Após análise e testes em laboratório, chegou ao valor de 5,0% para o Teor Ótimo de CAP, ou seja, é a quantidade ideal de CAP que deve ser utilizado na composição da mistura asfáltica.

Brita 1	<b>26,2%</b>	Massa Específica Aparente do CP	<b>2,359</b>	Ninicial 9 Giros : %compactação da DMT	<b>88</b>
Pedrisco	<b>35,3%</b>	Máxima da Mistura (%VV=0)	<b>2,483</b>	Nmaximo 205 Giros : %compactação da DMT	<b>97</b>
Pó de Pedra	<b>32,1%</b>	Porcentagem de Vazios (%VV)	<b>5,0%</b>	Relação Filler / Ligante	<b>1,1</b>
Cal CH "I"	<b>1,4%</b>	Vazios do Agreg. Mineral (VAM)	<b>15,8%</b>	Temperatura de Moldagem C.P. (oC)	<b>175</b>
Teor ótimo de CAP adicionado	<b>5,0%</b>	Vazios Cheios de Asfalto (%VCA)	<b>68,3%</b>	Tempo de Condicionamento	<b>2h</b>
Absorção de CAP	<b>0,3%</b>	Nprojeto 125 Giros : %compactação da DMT	<b>96,1</b>	% de Grãos com Relação > (1 : 3) Arteris D 4791	<b>5,59</b>

**Figura 6:** Quadro resumo das características do projeto para amostra com diâmetro de 100 mm (Fonte: CDT Arteris, 2023).

Após a verificação de teor máximo e composição, é realizado a granulometria dos materiais.

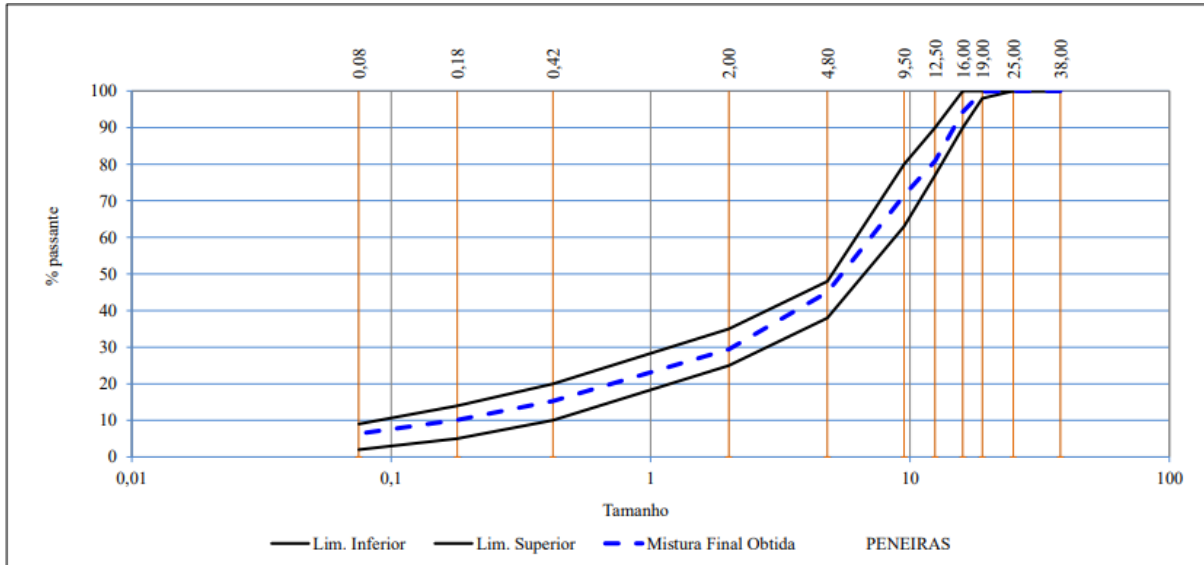


Peneiras		Brita 1	Pedrisco	Pó de Pedra	Cal CH "I"	Mistura Final Obtida	Faixa Especificada		Faixa de Trabalho	
Certificado		CDT-909-2023	CDT-910-2023	CDT-911-2023	-	-				
ASTM	mm	27,6%	37,2%	33,8%	1,5%	100,0%	Lim. Inferior	Lim. Superior	Lim. Inferior	Lim. Superior
1 1/2"	38,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100
1"	25	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100
3/4"	19,0	99,4	100,0	100,0	100,0	100	98	100	93	100
5/8"	16,0	79,1	100,0	100,0	100,0	94	90	100	87	100
1/2"	12,5	30,4	100,0	100,0	100,0	81	77	90	74	88
3/8"	9,5	4,5	94,1	100,0	100,0	72	63	80	65	79
Nº 4	4,8	0,8	25,6	100,0	100,0	45	38	48	40	50
Nº 10	2,0	0,8	2,9	78,9	100,0	29	25	35	24	34
Nº 40	0,42	0,8	2,0	38,0	95,7	15	10	20	10	20
Nº 80	0,18	0,8	1,9	23,5	87,0	10,1	5	14	7,1	13,1
Nº 200	0,075	0,6	1,6	13,1	78,3	6,4	2	9	4,4	8,4

**Figura 7:** Granulometria dos materiais Pedreira MBL – BRITA SUL (Fonte: CDT Arteris, 2023).

Tamanho máximo nominal	16 mm	Espessura mínima da camada	4,0 cm
% de Grãos com Relação > (1 : 3) Retido 5/8	ARTERIS D 4791	Máximo 20	
% de Grãos com Relação > (1 : 3) Retido 1/2	ARTERIS D 4791	Máximo 20	
% de Grãos com Relação > (1 : 3) Retido 3/8	ARTERIS D 4791	Máximo 20	
% de Grãos com Relação > (1 : 5) Retido 5/8	ARTERIS D 4791	Máximo 5	
% de Grãos com Relação > (1 : 5) Retido 1/2	ARTERIS D 4791	Máximo 5	
% de Grãos com Relação > (1 : 5) Retido 3/8	ARTERIS D 4791	Máximo 5	
Desgaste Los Angeles	ABNT NBR-6465	Máximo 40	
Equivalente de Areia	ABNT NBR-12052	Mínimo 60	
Azul de Metileno	ARTERIS TP-57	≤ 8	

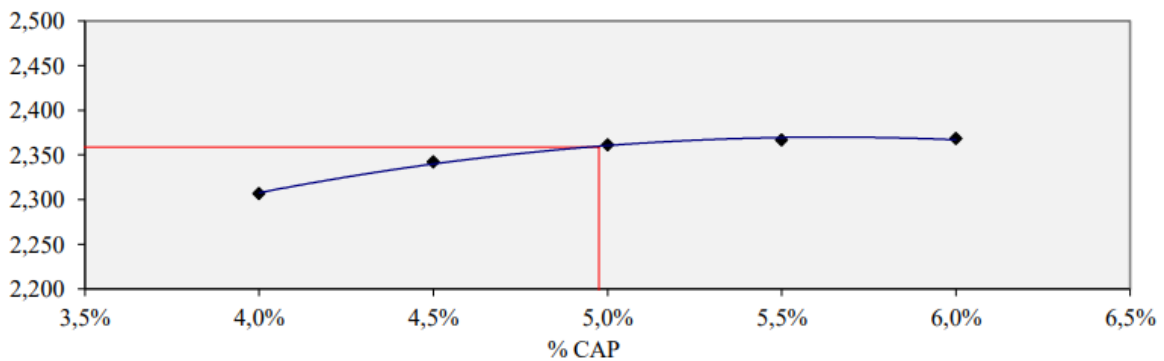
**Figura 8:** Caracterização dos materiais (Fonte: CDT Arteris, 2023).



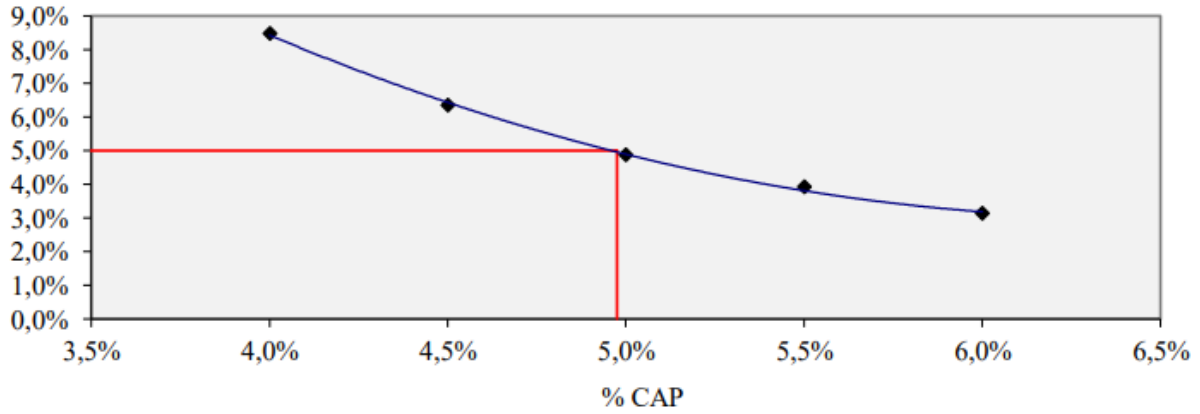
**Figura 9:** Gráfico da mistura (Fonte: CDT Arteris, 2023).

Nprojeto 125 Giros :		Tempo de Condicionamento	2h	Temperatura de Moldagem C.P. (oC)	175	Pressão Aplicada 600 kPa			
Diâmetro da Amostra 100 mm		Altura da Amostra	115 mm	Ângulo Interno de Giro 1,16°		Velocidade 30 Giros / minuto			
% DE LIGANTE	Massa Específica Aparente do CP	Massa Específica Máxima da Mistura (%VV=0)	Porcentagem de Vazios (%VV)	Vazios do Agreg. Mineral (VAM)	Vazios Cheios de Asfalto (%VCA)	Ninicial 9 Giros : %compactação da DMT	Nprojeto 125 Giros : %compactação da DMT	Nmaximo 205 Giros : %compactação da DMT	
4,0%	2,306	2,520	8,5%	16,8%	49,6%	-	-	-	
4,5%	2,342	2,501	6,3%	16,0%	60,3%	-	-	-	
5,0%	2,361	2,482	4,9%	15,7%	69,1%	-	-	-	
5,5%	2,366	2,463	3,9%	16,0%	75,5%	-	-	-	
6,0%	2,368	2,445	3,1%	16,4%	80,9%	-	-	-	
<b>ESPECIFICAÇÃO: Particular para Execução de Concreto Asfáltico Usinado a Quente - CA - Designação ARTERIS ES 027- Rev. 019 (Julho/2021)</b>									
Mínimo	-	-	3,0%	13,0%	65,0%	-	-	-	
Máximo	-	-	5,0%	15,0%	75,0%	89%	96%	98%	
Definição do teor ótimo de cap em função da porcentagem de vazios									
5,0%	2,359	2,483	5,0%	15,8%	68,3%	88%	96%	97%	

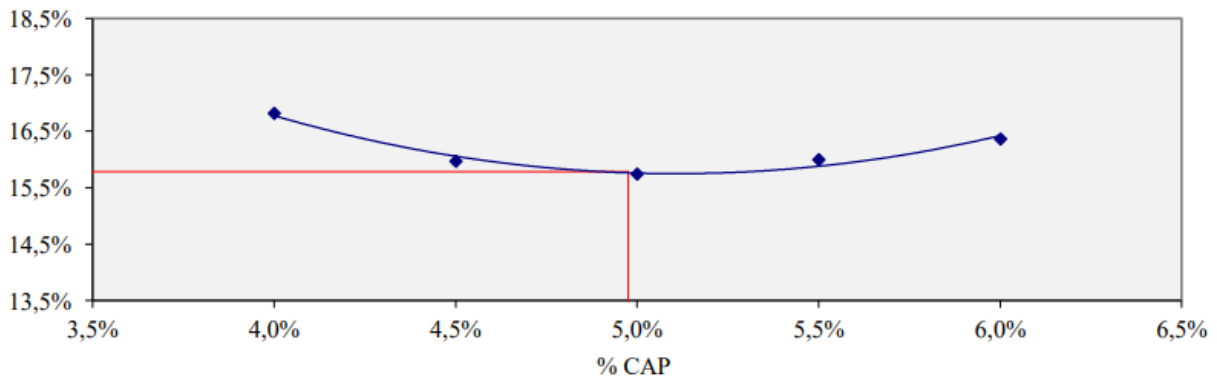
**Figura 10:** Resultados obtidos nos corpos de prova moldados no compactador giratório (Fonte: CDT Arteris, 2023).



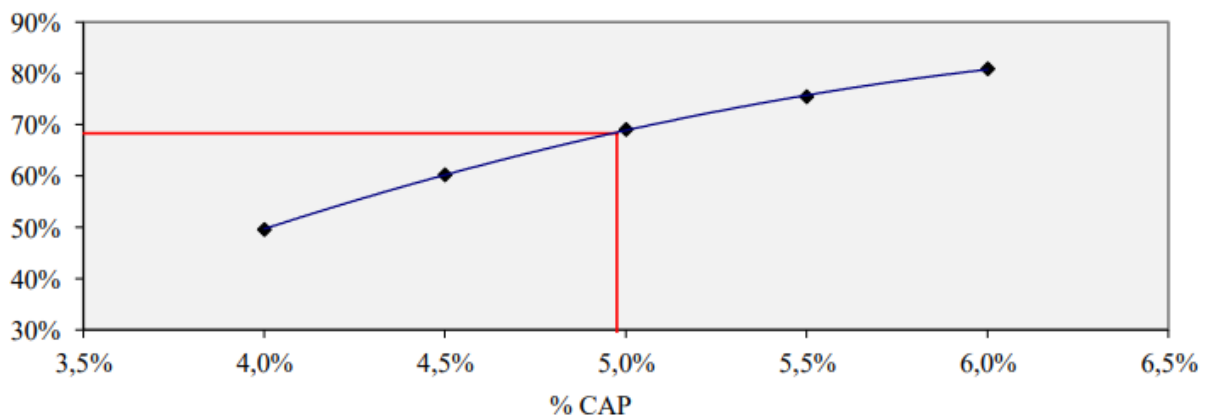
**Figura 11:** Densidade aparente x Teor de CAP (Fonte: CDT Arteris, 2023).



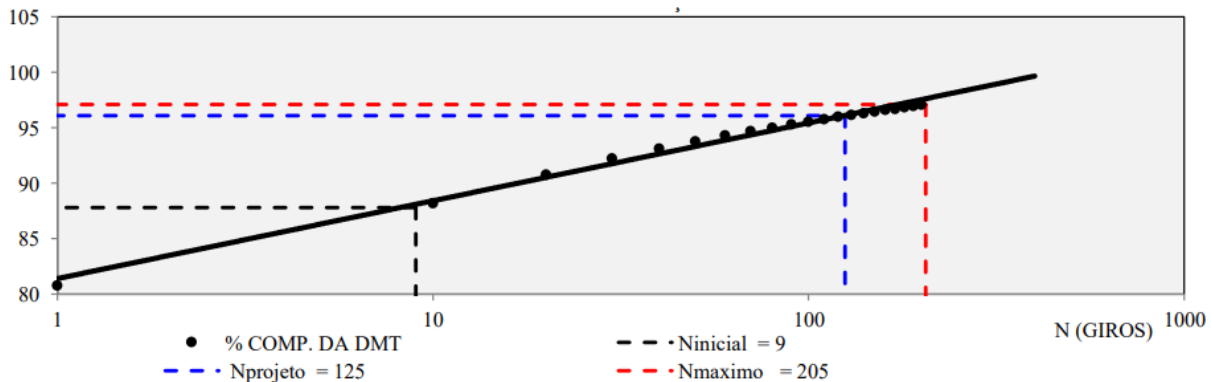
**Figura 12:** Porcentagem de Vazios - %VV x Teor de CAP (Fonte: CDT Arteris, 2023).



**Figura 13:** Porcentagem de Vazios do Agregado Mineral – %VAM x Teor de CAP (Fonte: CDT Arteris, 2023).



**Figura 14:** Porcentagem de Vazios Cheio de Asfalto – %VCA x Teor de CAP (Fonte: CDT Arteris, 2023).



**Figura 15:** Porcentagem de Compactação da Densificação Máxima Teórica – %DTM (Fonte: CDT Arteris, 2023).

## Resultados e Discussão

Com os dados fornecidos ao longo desta revisão, foram alcançados resultados significativos que contribuem para uma análise abrangente de comparação entre o asfalto borracha (AB) e o asfalto convencional (AC), evidenciando implicações significativas para a infraestrutura rodoviária. Desta forma, o asfalto-borracha apresentou-se como uma alternativa promissora, demonstrando maior durabilidade e proporcionando um nível superior de conforto aos usuários, o que pode resultar em benefícios consideráveis para a qualidade das estradas e a satisfação geral. Além disso, a análise de custo-benefício indicou uma clara vantagem para o asfalto borracha, evidenciando que sua adoção pode representar uma escolha economicamente vantajosa e sustentável. Destaca-se ainda que o asfalto-borracha contribui para a preservação do meio ambiente, pois utiliza pneus descartados de forma incorreta, ajudando a reduzir resíduos poluentes. Conforme dados do DNIT (2022), o custo direto do metro cúbico do asfalto convencional e do asfalto borracha são, respectivamente, R\$ 128,64 e R\$ 151,76, corroborando a viabilidade financeira dessa inovação na pavimentação rodoviária. Esses resultados ressaltam a importância do asfalto borracha como uma solução abrangente que atende não apenas às demandas de durabilidade e conforto, mas também se destaca por seu impacto positivo no meio ambiente e eficiência econômica.

A partir da análise de diferentes ensaios, foram possíveis obter perspectivas práticas com relação aos desempenhos em laboratório. Se tratando da densidade aparente, é possível comparar como a densidade da mistura varia com diferentes teores de CAP. Um aumento na densidade aparente pode indicar uma melhor compactação e desempenho da mistura.

O segundo gráfico trás o volume de vazios, e o objetivo é investigar como o volume de vazios se comporta em relação à porcentagem de CAP. Um decréscimo no volume de vazios pode sugerir uma maior ocupação de espaços vazios pelo ligante asfáltico, indicando uma mistura mais densa.

Em seguida podemos examinar como a porcentagem de vazios no agregado mineral varia com diferentes teores de CAP. Uma diminuição nessa porcentagem pode indicar uma boa adesão do ligante aos agregados, contribuindo para uma mistura mais coesa.

Observa-se também, como a porcentagem de vazios preenchidos pelo asfalto se relaciona com o teor de CAP. Um aumento pode indicar uma melhor cobertura e envolvimento do agregado pelo ligante asfáltico.

E por fim, o último que se trata da densificação máxima teórica, permite avaliar como a porcentagem de compactação em relação à densificação varia com diferentes teores de CAP. Sendo que um aumento nessa porcentagem pode indicar uma melhor capacidade de compactação e densificação da mistura.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, fundamentados em análises laboratoriais consistentes, revelam de maneira inequívoca a eficácia e o potencial positivo da utilização do CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) com borracha em misturas asfálticas. A investigação abrangeu propriedades cruciais como densidade aparente, volume de vazios, porcentagem de vazios do agregado mineral, porcentagem de vazios cheios de asfalto e porcentagem de compactação da densificação máxima teórica, todas demonstrando melhorias notáveis quando o CAP borracha foi introduzido na formulação.

A análise dos resultados corrobora a viabilidade e a vantagem da adoção do CAP borracha como uma alternativa prática e eficaz para aprimorar as características das misturas asfálticas. Aumentos substanciais na densidade aparente indicam uma maior compacidade e resistência da mistura, enquanto a redução no volume de vazios sugere uma menor permeabilidade, aspectos cruciais para a durabilidade e vida útil das pavimentações.

Além disso, a incorporação do CAP borracha demonstrou contribuições positivas para a sustentabilidade, ao proporcionar uma destinação ambientalmente amigável para pneus descartados inadequadamente. A resiliência e durabilidade superiores do CAP borracha apresentam-se como uma alternativa viável e vantajosa para a indústria da pavimentação.

Dessa forma, com base nos resultados positivos obtidos em laboratório, é possível afirmar que a utilização do CAP borracha emerge como uma alternativa viável e promissora na formulação de misturas asfálticas. Estes achados não apenas respaldam a eficácia do CAP

borracha em termos de desempenho técnico, mas também destacam seu potencial para contribuir positivamente para a sustentabilidade ambiental no setor de pavimentação. Essa pesquisa fornece uma base sólida para a consideração prática e implementação dessa inovação em projetos reais de infraestrutura rodoviária.

## **Considerações finais**

Com a construção civil adotando novos métodos construtivos e buscando inovações em tecnologia e qualidade para alcançar um melhor desempenho, torna-se imperativo a implementação de programas que visem a redução dos impactos ambientais com foco na sustentabilidade.

Diante do exposto, fica evidente que a adoção do asfalto-borracha é altamente viável, mesmo com algumas desvantagens, contudo, essa metodologia poderia ser implementada em todo o território nacional, visando a redução ou eliminação completa do descarte inadequado de pneus na natureza. Quanto aos objetivos estabelecidos, todos foram alcançados, sendo a principal dificuldade encontrada, o número limitado de publicações, especialmente em relação a livros.

A introdução deste método com asfalto-borracha pode reduzir os índices de poluição ambiental, no entanto, a poluição atmosférica persiste devido à queima do material. Partindo desse pressuposto, o ideal seria a realização de estudos e, especialmente análises práticas, que busquem reduzir essas desvantagens. Eliminar um problema não deve resultar na criação de outro. Além disso, o aumento do número de publicações incentiva os profissionais a adotarem essa prática de forma progressiva em municípios e capitais, proporcionando mais benefícios à sociedade.

## **Agradecimentos**

Gostariamos de expressar os sinceros agradecimentos a todas as pessoas que tornaram possível a conclusão deste trabalho de pesquisa. Em primeiro lugar, agradecer a Deus e também ao nosso orientador Mestre Rafael Magdalena pela orientação valiosa, apoio constante e dedicação ao longo deste processo. Seu conhecimento e insights foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Agradecemos também à nossa família pelo apoio incondicional e incentivo ao longo

da jornada acadêmica. As palavras de encorajamento e amor foram a força motriz por trás das realizações.

Aos amigos e colegas, obrigado por compartilharem suas ideias, experiências e apoio durante este desafio. Suas contribuições foram inestimáveis.

Por fim, agradeço a todos os que participaram de alguma forma deste projeto, direta ou indiretamente. Este TCC representa não apenas o esforço, mas também o resultado da colaboração e apoio de muitas pessoas incríveis. Estamos profundamente gratos por todas as contribuições que tornaram este trabalho possível, e espero que ele possa contribuir de alguma forma para o avanço do conhecimento na área. Obrigado a todos.

## Referências

BERNUCCI et al., L.B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2008.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES – CNT. **Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/cnt-divulga-estudo-por-que-pavimento-rodovias-brasil-nao-duram-resultados>> Acesso em: 08 out. 2023

DNIT. **Índices de Reajustamentos de Obras Rodoviárias**. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/indices-de-reajustamentos/indices-de-reajustamentos-de-obras-rodoviario>>. Acesso em: 17/11/2023.

FRANÇA, M.D.N., CRUZ, C.P.T. **Asfalto-borracha: uso do asfalto-borracha no Brasil**. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/35572/1/Asfalto-borracha%3a%20uso%20do%20asfalto-borracha%20no%20Brasil.pdf>> Acesso em: 03/09/23.

GIULIO, G. D. **Vantagens ambientais e econômicas no uso de borracha em asfalto**. Disponível em: <[http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1808-23942007000300008&lng=pt&nrm=is](http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1808-23942007000300008&lng=pt&nrm=is)> Acesso em 03/09/23.



GRECA ASFALTOS. **Contabilidade ecológica asfalto borracha.** Disponível em: <<https://www.grecaasfaltos.com.br/contabilidade-ecologica-asfalto-borracha/>> Acesso em: 14/11/2023

GRECA ASFALTOS. **Especificações Técnicas – ECOFLEX.** Disponível em: <<https://www.grecaasfaltos.com.br/wp-content/conteudos/especificacoes-produtos/especificacoes-ecoflex-greca-asfaltos.pdf>> Acesso em: 02/10/23.

LEITE, J.R.S.J, LIMA, I.A., DINI, M.R.M. **A utilização de asfalto-borracha na construção de estradas: viabilidade técnica e sustentabilidade.** Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/25131/1/Projeto%20-%20Italo%20e%20Rosemberg.pdf>> Acesso em: 10/09/23.

SILVA, G., COÊLHO, M.F.O. **Uso do asfalto borracha na pavimentação de rodovias.** Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/pavimentacao-de-rodovias>> Acesso em: 05/09/23.

SOUZA, I.N.R.T., MATA, M.S.S., GUEDES, R.O. **Análise da utilização do asfalto borracha na pavimentação como uma solução técnica e sustentável.** Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/asfalto-borracha>> Acesso em: 10/09/23.

ZATARIN, A.P.M., SILVA, A.L.F., ANEMAM, L.S., BARROS, M.R., CHRISOSTOMO, W. **Viabilidade da pavimentação com asfalto-borracha.** Disponível em: <[https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao\\_ambiental/article/view/3323/2822](https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/3323/2822)> Acesso em: 12/09/23.