v7.n10.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

PAVIMENTAÇÃO SUSTENTÁVEL EM IMPERATRIZ – MA: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ASFALTO CONVENCIONAL E ASFALTO-BORRACHA NA AVENIDA SILVINO SANTOS

SUSTAINABLE PAVING IN IMPERATRIZ – MA: A COMPARATIVE STUDY BETWEEN CONVENTIONAL ASPHALT AND RUBBER-ASPHALT ON SILVINO SANTOS AVENUE

PAVIMENTACIÓN SOSTENIBLE EN IMPERATRIZ – MA: ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE ASFALTO CONVENCIONAL Y ASFALTO-CAUCHO EN LA AVENIDA SILVINO SANTOS

Kayssa de Araújo Santos Gadelha[1], Gabriel Feitosa do Vale Costa[2], Samuel Sousa dos Santos[3], Carlos Eduardo de Oliveira dos Santos[4], Marcos Aurélio Rodrigues Sousa Júnior[5], Ciguivon Jose de Oliveira Junior[6], Giuliana Lima Oliveira[7], Mário Silva de Lucena[8]

e7109175
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i10.9175

PUBLICADO: 10/2026

RESUMO

Este artigo analisa as práticas de aplicação, a inovação, o desempenho mecânico e a durabilidade do pavimento de asfalto-borracha, propondo sua implementação na Avenida Silvino Santos, em Imperatriz – MA, sob a perspectiva da mobilidade urbana e da sustentabilidade. A via possui tráfego de médio a alto volume e perfil de uso do solo misto (residências, comércios, distribuidoras e indústrias), estando submetida a veículos pesados e severas intempéries do clima tropical. A pesquisa aborda as patologias dos pavimentos convencionais, catalogando, por meio de diagnóstico de campo in loco, falhas como deformações permanentes e buracos. O estudo incorpora uma análise mecânico-estrutural fundamentada na equivalência de espessuras pelo coeficiente K, demonstrando que uma camada delgada de 3,5 cm de asfalto-borracha do tipo Gap-Graded possui desempenho equivalente a 5,0 cm de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) convencional. A parametrização orçamentária adotou composições oficiais do SICRO/DNIT via OrçaFascio convertidas para metro quadrado (m²). A modelagem do ciclo de vida em 10 anos revela que, embora o custo de usinagem por tonelada seja superior, a menor espessura reduz a diferença do investimento inicial para R$ 5,56/m², enquanto a maior resistência mecânica reduz a taxa de manutenção acumulada de 70% para 12%. Conclui-se que a tecnologia consolida uma economia líquida de R$ 69.119,86 (13,9%) aos cofres públicos, alinhando vantagens no ciclo de vida à destinação ecológica de cerca de 7.000 pneus inservíveis por quilômetro pavimentado.

PALAVRAS-CHAVE: Mobilidade Urbana. Asfalto-Borracha. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This article analyzes application practices, innovation, mechanical performance, and durability of rubber-asphalt pavement, proposing its implementation on Silvino Santos Avenue in Imperatriz – MA, from the perspective of urban mobility and sustainability. The avenue features medium-to-high traffic volume and mixed land use (residential, commercial, distribution, and industrial), subjected to heavy vehicles and severe tropical weather. The research addresses conventional pavement distresses, cataloging, through on-site diagnostic inspections, failures such as permanent deformation and potholes.

[1] *Universidade CEUMA, graduanda(o) em Arquitetura e Urbanismo.*
[2] *Universidade CEUMA, graduando em Arquitetura e Urbanismo.*
[3] *Universidade CEUMA, graduando em Arquitetura e Urbanismo.*
[4] *Universidade CEUMA, graduando em Arquitetura e Urbanismo.*
[5] *Doutorando em Ciência dos Materiais pela UFMA, Mestre em Ciência dos Materiais pela UFMA e docente.*
[6] *Engenheiro Civil, especialista (MBA) em Estruturas e Fundações.*
[7] *Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela PUC-Campinas, docente pesquisadora.*
[8] *Engenheiro Civil, mestrando pela UFPA, especialista e docente.*

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

The study incorporates a mechanical-structural analysis based on layer equivalence coefficients (K factor), demonstrating that a 3.5 cm thin layer of Gap-Graded rubber-asphalt achieves structural performance equivalent to 5.0 cm of conventional Hot Mix Asphalt (HMA). Budget parameterization used official SICRO/DNIT compositions via OrçaFascio converted to square meters (m²). A 10-year lifecycle model shows that while production cost per ton is higher, reduced thickness narrows the initial investment gap to R$ 5.56/m², while superior mechanical resistance reduces accumulated maintenance rates from 70% to 12%. It is concluded that the technology yields net savings of R$ 69,119.86 (13.9%) for public administration, combining lifecycle cost advantages with the ecological recycling of approximately 7,000 scrap tires per paved kilometer.

KEYWORDS: *Urban Mobility. Rubber-Asphalt. Sustainability.*

RESUMEN

Este artículo analiza las prácticas de aplicación, la innovación, el desempeño mecánico y la durabilidad del pavimento de asfalto-caucho, proponiendo su implementación en la Avenida Silvino Santos, en Imperatriz – MA, bajo la perspectiva de la movilidad urbana y la sostenibilidad. La vía posee tráfico de medio a alto volumen y uso del suelo mixto (residencial, comercial, distribuidoras e industrias), sometida a vehículos pesados y clima tropical. La investigación aborda las patologías de los pavimentos convencionales, catalogando mediante diagnóstico de campo in loco fallas como deformaciones permanentes y baches. El estudio incorpora un análisis mecánico-estructural basado en la equivalencia de espesores por el coeficiente K, demostrando que una capa de 3,5 cm de asfalto-caucho tipo Gap-Graded equivale estructuralmente a 5,0 cm de CBUQ convencional. La parametrización presupuestaria utilizó composiciones oficiales SICRO/DNIT convertidas a metro cuadrado (m²). El modelo de ciclo de vida a 10 años revela que, aunque el costo por tonelada sea superior, la menor capa reduce la diferencia del costo inicial a R$ 5,56/m², mientras que la durabilidad reduce el mantenimiento acumulado del 70% al 12%. Se concluye que la tecnología consolida un ahorro neto de R$ 69.119,86 (13,9%) para la gestión pública, combinando ventajas de ciclo de vida con la reutilización ecológica de aproximadamente 7.000 neumáticos por kilómetro.

PALABRAS CLAVE: *Movilidad Urbana. Asfalto-Caucho. Sostenibilidad.*

INTRODUÇÃO

Este estudo insere-se na área de conhecimento do urbanismo, mais especificamente na mobilidade urbana e qualidade de vida em áreas urbanizadas. O interesse pelo tema surgiu a partir da observação cotidiana das dificuldades enfrentadas por moradores e motoristas em avenida de grande fluxo da cidade de Imperatriz – MA, como a Avenida Silvino Santos, em função da precariedade do asfalto, da drenagem pluvial inadequada e do intenso tráfego de caminhões e veículos comerciais.

Como hipótese, acredita-se que o uso do asfalto-borracha, por suas propriedades de maior elasticidade, resistência à fadiga e impermeabilidade, pode representar uma alternativa viável e sustentável para os problemas enfrentados atualmente nessas vias submetidas a cargas elevadas. A relevância da investigação está em avaliar soluções sustentáveis para a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

pavimentação urbana, especialmente em regiões com altos índices pluviométricos e forte amplitude térmica, como é o caso de Imperatriz.

O objetivo geral da pesquisa é analisar os impactos da pavimentação com asfalto-borracha na Avenida Silvino Santos, considerando aspectos de mobilidade e qualidade de vida da população. Os objetivos específicos são: identificar as condições atuais da via por meio de levantamento fotográfico e diagnóstico de patologias *in loco*, demonstrar a equivalência mecânica de espessuras entre misturas convencionais e modificadas, parametrizar os custos de usinagem via Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO/DNIT) utilizando a base de dados do OrçaFascio e avaliar os benefícios socioambientais na infraestrutura urbana municipal.

Nas últimas décadas, o crescimento urbano acelerado trouxe desafios significativos para a infraestrutura viária das cidades brasileiras, especialmente nas regiões Norte e Nordeste. Em Imperatriz, a pavimentação tem sido pauta recorrente nas discussões sobre planejamento urbano e políticas públicas voltadas à mobilidade e acessibilidade.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Pavimentação asfáltica e conceito de equivalência estrutural

A pavimentação asfáltica é uma técnica amplamente utilizada na construção de vias urbanas e rodovias, sendo essencial para garantir a mobilidade e segurança dos usuários. Os materiais utilizados na pavimentação influenciam diretamente a durabilidade, o custo e o impacto ambiental das obras.

A composição do pavimento é formada por camadas granulares e de revestimento betuminoso projetadas para distribuir as tensões oriundas do tráfego. No dimensionamento tradicional de pavimentos, a capacidade estrutural necessária (Sn) é calculada pelo produto do coeficiente estrutural do material (K) pela sua espessura (R), conforme a fórmula:

$$Sn = R \times K$$

Onde:

Sn: Número de Estrutura do Pavimento (Capacidade de suporte necessária);R: Espessura da camada de revestimento (cm);K: Coeficiente de equivalência estrutural do material.

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) com CAP 50/70 possui coeficiente estrutural de referência Kconv = 1,00. Por sua vez, as misturas asfálticas modificadas por borracha do tipo *Gap-Graded* apresentam elevada resiliência, maior módulo dinâmico e superior resistência à propagação de trincas por fadiga, conferindo um coeficiente estrutural de Kborracha ≈ 1,40 a 1,45.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Dessa forma, para obter a mesma capacidade de suporte mecânico e proteção do pavimento contra deformações permanentes:

$$R_{conv} \times K_{conv} = R_{borracha} \times K_{borracha}$$
$$5{,}0\ cm \times 1{,}00 = R_{borracha} \times 1{,}43 \Rightarrow R_{borracha} \approx 3{,}5\ cm$$

Essa equivalência mecânica demonstra que uma camada de 3,5 cm de asfalto-borracha possui desempenho e vida útil equivalentes (ou superiores) a uma camada de 5,0 cm de CBUQ convencional, permitindo otimizar o consumo de massa por metro quadrado de pista executada.

1.2. Asfalto convencional

O asfalto convencional, também conhecido como Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), é composto por agregados minerais (como areia e brita) e por um ligante asfáltico derivado do petróleo, o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Essa mistura é produzida em usinas a altas temperaturas e aplicada a quente nas vias.

Entre as vantagens do asfalto convencional estão a facilidade de aplicação e o custo inicial relativamente baixo. No entanto, esse tipo de pavimento apresenta algumas limitações, como menor resistência a deformações e fissuras, especialmente em regiões com tráfego intenso ou variações climáticas significativas. Além disso, sua durabilidade pode ser comprometida, exigindo manutenções frequentes.

1.3. O asfalto-borracha e a gestão de resíduos sólidos

A disposição inadequada de pneus inservíveis constitui um grave problema ambiental e de saúde pública no Brasil, favorecendo a proliferação de vetores de doenças e a poluição do solo e corpos d'água. A aplicação do pó de borracha na pavimentação atende às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e da Resolução CONAMA nº 416/2009, promovendo a logística reversa e a economia circular.

A incorporação do pó de borracha ao ligante asfáltico pode ocorrer via processo seco ou via úmida (terminal blending ou field blending). No processo via úmida, regulamentado pela norma DNIT 111/2009-EM, o pó de borracha reage quimicamente com o ligante asfáltico a altas temperaturas (170 °C a 200 °C), promovendo a digestão e o intumescimento das partículas de polímero. Esse processo eleva a viscosidade e o ponto de amolecimento do ligante, reduzindo sua suscetibilidade térmica e aumentando a elasticidade do revestimento.

Do ponto de vista do comportamento mecânico, o asfalto-borracha estruturado em granulometria descontínua (Gap-Graded) apresenta elevadas propriedades elásticas e capacidade de dissipação de energia de deformação. Estudos experimentais avançados

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

conduzidos por Sousa (2026), mediante ensaios de fadiga por tração direta com aplicação do modelo Viscoelástico de Dano Contínuo Simplificado (S-VECD) e ensaios de deformação permanente por varredura de tensões (Stress Sweep Rutting - SSR), comprovam que a adição de borracha reduz significativamente o afundamento em trilha de roda e amplia a vida útil do revestimento à fadiga em até três vezes quando comparada ao CBUQ convencional (Faixa B).

O descarte inadequado de pneus inservíveis é um dos grandes desafios ambientais da sociedade contemporânea. Estima-se que, anualmente, cerca de 450 mil toneladas de pneus sejam descartadas no Brasil, o que representa um problema significativo para os centros urbanos, dado o seu alto tempo de decomposição e potencial de contaminação do solo e da água (ABNT, 2020).

Nesse cenário, o reaproveitamento de pneus na pavimentação asfáltica surge como uma solução sustentável e tecnicamente viável. A borracha extraída de pneus usados é moída até atingir a forma de pó de borracha (*crumb rubber*), que é incorporado ao cimento asfáltico de petróleo (CAP), resultando no chamado asfalto-borracha.

1.4. Comparativo entre asfalto convencional e asfalto-borracha

A escolha entre o asfalto convencional e o asfalto-borracha deve considerar fatores como o volume de tráfego, condições climáticas, disponibilidade de materiais e objetivos ambientais. Em projetos que visam maior durabilidade e sustentabilidade, o asfalto-borracha pode ser uma alternativa vantajosa.

Além dos benefícios estruturais, a textura superficial das misturas Gap-Graded com asfalto-borracha proporciona importante atenuação do ruído gerado pela interação pneu-pavimento. Investigações experimentais in loco realizadas por Callai (2011) na Universidade de São Paulo (USP) demonstram uma redução do nível de ruído do tráfego urbano na faixa de 2 dB(A) a 5 dB(A) em relação aos revestimentos densos convencionais, melhorando a qualidade de vida e o conforto acústico nas vias urbanas.

Em regiões caracterizadas por clima tropical de elevada radiação e precipitação concentrada, como o Norte e Nordeste do Brasil, a presença da borracha preserva a flexibilidade do ligante e retarda o envelhecimento oxidativo precoce (COELHO, 2021). Sob a ótica da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a reciclagem de aproximadamente 7.000 pneus inservíveis por quilômetro pavimentado desvia volumoso passivo ambiental de aterros e queimadas, reduzindo a pegada de carbono global da infraestrutura viária (ROMANIELLO; SANTOS, 2021).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 1. Comparativo técnico entre asfalto convencional e asfalto-borracha

Característica	Asfalto Convencional	Asfalto-Borracha
Composição	Cimento Asfáltico de Petróleo Puro (CAP 50/70)	CAP + 15% a 22% de Pó de Borracha de Pneu
Coeficiente Estrutural	1,00 (Padrão DNIT)	1,40 a 1,45 (Elevada absorção de tensões)
Espessura típica equivalente	5,0 cm (exigência mecânica mínima)	3,5 cm (mesmo desempenho estrutural)
Resistência a trincas e fadiga (deformações)	Média (suscetível a trincamento reflexivo)	Alta (retarda aparecimento de trincas até 3x)
Redução de ruído	Padrão (0 a 1 dB)	Acentuada (redução de 3 a 6 dB no atrito)
Impacto ambiental	Maior consumo de recursos de petróleo	Sustentável (reutiliza até 7.000 pneus/km)

Fonte: Autores (2026).

1.5. Vantagens do reaproveitamento de pneus na pavimentação

As vantagens técnicas, ambientais e de durabilidade do reaproveitamento de pneus descartados na pavimentação podem ser consolidadas nos seguintes eixos:

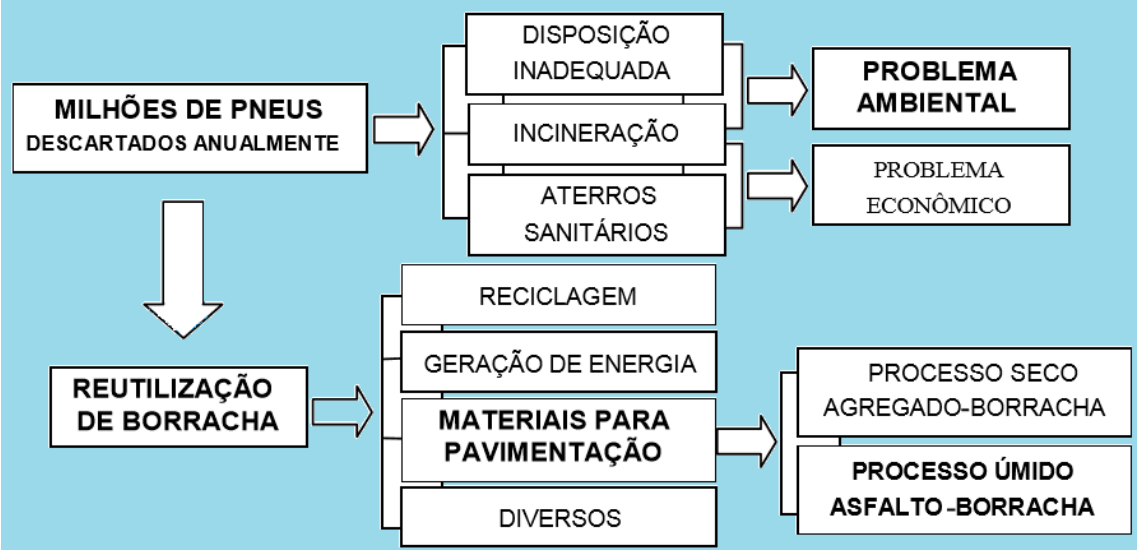
- Sustentabilidade ambiental: contribui para a redução de resíduos sólidos e diminui o impacto ambiental do descarte inadequado;
- Melhoria do desempenho do pavimento: maior elasticidade, resistência a trincas e deformações permanentes, maior durabilidade;
- Desempenho acústico e térmico: reduz o ruído gerado pelo tráfego e melhora a resistência a variações de temperatura;
- Redução de custos a longo prazo: embora o custo inicial seja mais elevado, a durabilidade estendida gera economia com manutenções e recapeamentos.

Segundo Silva *et al.* (2023), um quilômetro de asfalto-borracha pode reutilizar cerca de 7 mil pneus descartados, o que demonstra seu grande potencial de contribuição para políticas públicas de reaproveitamento de resíduos sólidos.

Oda (2000) apresenta um fluxograma que ilustra as possíveis destinações dos pneus descartados, suas consequências ambientais e econômicas e as respectivas formas de reutilização:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Esquema de reaproveitamento de pneus descartados



Fonte: Oda (2000).

2. METODOLOGIA

2.1. Método adotado

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, com abordagem qualiquantitativa e descritiva. Foi adotado o método de estudo de caso, utilizando a Avenida Silvino Santos (Imperatriz - MA) como objeto principal de análise. A coleta de dados ocorreu durante o mês de agosto de 2026, abrangendo levantamento visual de campo, inspeção de defeitos em conformidade com a norma DNIT 005/2003-TER e registros fotográficos da malha viária.

Para a parametrização orçamentária dos materiais betuminosos usinados, adotaram-se as composições oficiais do SICRO (DNIT) extraídas do sistema OrçaFascio para a Região Nordeste. Foram utilizadas especificamente as composições de usinagem 6416077 (CBUQ Faixa C) e 6416213 (Concreto Asfáltico c/ Asfalto-Borracha), considerando tanto os regimes de execução onerado quanto desonerado.

2.2. Metodologia de conversão de custos SICRO (T para m²)

Para obter o custo do material betuminoso usinado por metro quadrado (R$/m²), correlaciona-se o custo da tonelada da massa com a massa específica compactada (γ) e a espessura (e) da camada de projeto, utilizando-se as seguintes formulações físicas:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Consumo de Massa (t/m²) = Espessura (m) × Massa Específica Compactada (t/m³)
Custo por m² (R$/m²) = Consumo (t/m²) × Custo de Usinagem SICRO (R$/t)

Foram adotadas as seguintes constantes físicas de projeto para os cálculos:

- Asfalto Convencional (CBUQ): Massa específica compactada γ = 2,40 t/m³; Espessura de revestimento e = 0,05 m (5,0 cm) ⇒ Consumo por área = 0,120 t/m²;
- Asfalto-Borracha (Gap-Graded): Massa específica compactada γ = 2,35 t/m³; Espessura de revestimento e = 0,035 m (3,5 cm) ⇒ Consumo por área = 0,08225 t/m².

Como os custos de usinagem do SICRO são expressos em toneladas (t), essa conversão físico-financeira permite correlacionar fielmente a massa compactada de cada mistura com as espessuras equivalentes de projeto de acordo com a norma DNIT 112/2009-ME e os coeficientes de equivalência estrutural do método do DNER/DNIT.

2.3. Modelagem da periodicidade de manutenção no ciclo de vida (10 anos)

A modelagem financeira de 10 anos estabelece ciclos distintos de deterioração e manutenção:

• Pavimento Convencional (CBUQ): Devido à menor resistência à fadiga em via urbana sob tráfego comercial e severa pluviometria em Imperatriz, prevê-se necessidade de intervenções corretivas (tapa-buracos e selagem de trincas) a partir do 2º ano, com fresagem e recapeamento no 5º e 8º anos. Acumuladamente em 10 anos, esses reparos atingem a taxa histórica de 70% do custo inicial da obra.

• Asfalto-Borracha (Gap-Graded): Em função da elevada elasticidade e retardo do trincamento reflexivo, a via necessita apenas de manutenções preventivas pontuais a partir do 6º ano. A taxa de intervenção acumulada limita-se a 12% do investimento inicial em 10 anos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização da Avenida Silvino Santos e diagnóstico de campo *in loco*

A Avenida Silvino Santos constitui uma das vias arteriais de conexão estratégica no município de Imperatriz - MA. A caracterização geométrica e de tráfego da intervenção viária abrange:

- Extensão total analisada: 2,70 km (2.700 metros);
- Largura média da pista de rolamento: 6,00 metros;
- Área total de pavimentação projetada: 16.200 m²;

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

- Volume e Composição do Tráfego: Apresenta tráfego de médio a alto volume, caracterizado pela circulação mista e ininterrupta de veículos leves (carros de passeio, motocicletas) e veículos pesados de grande porte (caminhões-caçamba, carretas de suprimento, ônibus urbanos e caminhões de distribuição);
- Perfil de Uso e Ocupação do Solo: Conecta áreas de intensa atividade socioeconômica, com presença marcante de residências, estabelecimentos comerciais, distribuidoras de alimentos/insumos e plantas fabris/indústrias. Esse fluxo contínuo de cargas pesadas associado ao tráfego residencial acentua de forma crítica as solicitações tangenciais e normais sobre o pavimento.

Figura 2. Extensão da Avenida Silvino Santos



Fonte: Google Maps (2026).

Durante o levantamento de campo *in loco* efetuado pelos autores no mês de agosto de 2026, identificou-se um estado avançado de degradação estrutural e funcional do pavimento existente em CBUQ convencional. As patologias predominantes observadas foram catalogadas e correlacionadas segundo as diretrizes e termos da Norma DNIT 005/2003-TER: a) Deformação Permanente nas Trilhas de Roda (Afundamento Plástico): Identificou-se a presença generalizada de deformações longitudinais nas calhas de tráfego pesado. Essa degradação decorre diretamente da baixa estabilidade e rigidez à deformação permanente do CBUQ convencional frente à combinação do tráfego pesado constante com as altas temperaturas de Imperatriz, promovendo o deslocamento plástico da massa asfáltica (Figuras 3 e 4);

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figuras 3 e 4. Deformação lateral e recalque estrutural



Fonte: Autores (2026).

b) Cavas e Buracos Expostos (Panelas): A ação conjunta do envelhecimento térmico do ligante e do acúmulo de águas pluviais gerou a evolução acelerada do trincamento para a ruptura completa da camada de rolamento. A percolação de água sob as cargas por eixo dos veículos comerciais fragiliza a base granular, gerando buracos sequenciais que colocam em risco a segurança e trafegabilidade urbana (Figuras 5, 6 e 7);

Figuras 5, 6 e 7. Buracos e remendos deteriorados na via.

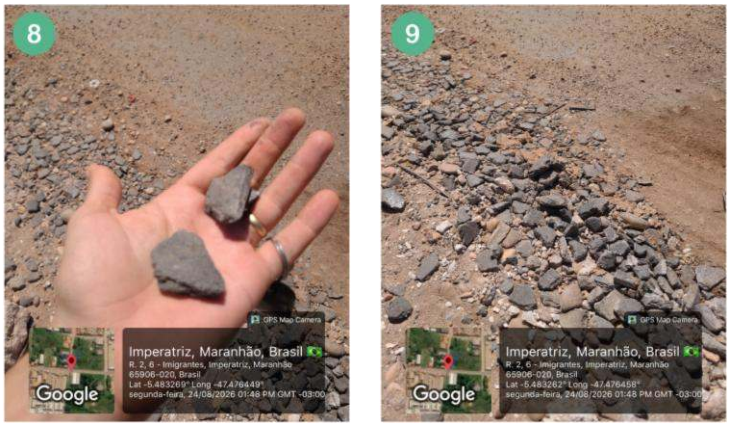


Fonte: Autores (2026).

c) Desagregação e Desgaste Superficial (Soltura de Agregados): Constatou-se a desagregação acentuada do revestimento existente, caracterizada pelo descolamento e pela soltura contínua dos agregados graúdos sob a ação de cisalhamento provocada pelos pneus de caminhões e ônibus comerciais que atendem às indústrias locais (Figuras 8 e 9).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figuras 8 e 9. Soltura de agregados e desgaste superficial da pista de rolamento



Fonte: Autores (2026).

3.2. Composições referenciais SICRO via OrçaFascio

A Tabela 2 apresenta as tarifas unitárias brutas oficiais para a usinagem das misturas asfálticas analisadas, extraídas do banco de dados unificado SICRO/DNIT correspondente à região Nordeste, via sistema OrçaFascio.

Tabela 2. Composição de preços unitários de usinagem SICRO (Nordeste)

Código SICRO	Descrição da Composição	Unid.	Custo Onerado (R$/t)	Custo Desonerado (R$/t)
6416077	Usinagem de Concreto Asfáltico (CBUQ) Faixa C c/ CAP 50/70	t	R$ 150,77	R$ 150,32
6416213	Usinagem de Concreto Asfáltico c/ Asfalto-Borracha	t	R$ 287,52	R$ 287,39

Fonte: Tabela Consultoria DNIT (2026).

3.3. Conversão e comparativo de custo por metro quadrado (m²)

Com base nos consumos específicos de massa decorrentes da espessura de projeto de cada revestimento, estabeleceu-se a transposição da unidade de peso comercializada (toneladas) para a área útil executada (m²), conforme demonstrado na Tabela 3.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 3. Conversão física e comparativo direto de custos de fornecimento

Tipo de Pavimento	Espessura	Consumo (t/m²)	Custo t (Onerado)	Custo m² (Onerado)	Custo t (Desonerado)	Custo m² (Desonerado)
Asfalto Convencional	5,0 cm	0,12000 t/m²	R$ 150,77	R$ 18,09	R$ 150,32	R$ 18,04
Asfalto-Borracha	3,5 cm	0,08225 t/m²	R$ 287,52	R$ 23,65	R$ 287,39	R$ 23,64

Fonte: Autores (2026).

Análise Econômica: Embora o custo por tonelada da massa usinada com asfalto-borracha seja 90,7% superior ao CBUQ convencional no regime onerado (R$ 287,52/t contra R$ 150,77/t), a diferença real por metro quadrado executado situa-se em apenas R$ 5,56/m² (R$ 23,65/m² contra R$ 18,09/m²). Essa drástica aproximação decorre diretamente da redução de 31,5% no consumo absoluto de massa mineral por área pavimentada, proporcionada pelo coeficiente estrutural mecânico superior da mistura modificada (Kborracha ≈ 1,43), permitindo o uso seguro de uma camada mais delgada.

3.4. Custos de manutenção e ciclo de vida útil

A análise da viabilidade financeira a longo prazo para a pavimentação da Avenida Silvino Santos é um pilar indispensável para o planejamento e gestão das vias urbanas em Imperatriz. Historicamente, a manutenção corretiva e preventiva de revestimentos convencionais em vias de tráfego denso consome vultosos recursos públicos ao longo dos anos.

A literatura científica consolida que a manutenção de pavimentos asfálticos convencionais pode representar até 70% do custo original de execução ao longo do seu ciclo de vida útil, ao passo que as misturas asfálticas modificadas com borracha geram apenas 12% de despesa com intervenções de manutenção. Para uma área total de intervenção de 16.200 m² e horizonte de projeto de 10 anos, os custos totais acumulados estão sintetizados na Tabela 4.

Tabela 4. Modelagem financeira e custo do ciclo de vida acumulado em 10 anos

Tipo de Pavimento	Custo Material Inicial (16.200 m²)	Taxa Manutenção (10 Anos)	Custo Manutenção (R$)	Custo Total Acumulado (R$)
Asfalto Convencional	R$ 293.058,00	70% do valor inicial	R$ 205.140,60	R$ 498.198,60
Asfalto-Borracha	R$ 383.106,02	12% do valor inicial	R$ 45.972,72	R$ 429.078,74

Fonte: Autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Essa premissa de custos operacionais encontra sólida sustentação empírica em avaliações de longo prazo conduzidas em vias urbanas brasileiras. No monitoramento real de sete anos conduzido por Sanches, Grandini e Junior (2012) na Rua Ângelo Domingos Durigan, em Curitiba-PR, avaliou-se o desgaste comparativo de trechos executados com asfalto convencional (CAP 50/70) e asfalto-borracha. A avaliação visual ao final do período revelou que 70% do pavimento convencional exigiu intervenções de manutenção física pesada, enquanto o trecho com asfalto-borracha demandou apenas 10% de reparos pontuais de manutenção.

Embora o custo de execução inicial em Curitiba tenha sido inferior para o asfalto convencional (R$ 46,66/m² contra R$ 77,22/m² do asfalto-borracha), as intervenções e recapeamentos necessários ao longo do período de sete anos elevaram o custo acumulado real final do trecho convencional para R$ 93,77/m², tornando-o 11,69% mais oneroso e ineficiente do que o trecho de asfalto-borracha, que encerrou o período acumulando apenas R$ 83,95/m² de custo total.

Essa validação prática respalda diretamente a modelagem financeira da Avenida Silvino Santos: embora o investimento inicial de implantação do asfalto-borracha na avenida seja R$ 90.048,02 superior (R$ 383.106,02 em relação aos R$ 293.058,00 do CBUQ), a drástica redução na recorrência de manutenção corretiva reverte-se em uma economia acumulada real de R$ 69.119,86 aos cofres municipais de Imperatriz, o que representa uma redução real de 13,9% nos gastos globais da via no período de 10 anos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pavimentação asfáltica desempenha papel estratégico na mobilidade urbana, na conservação ambiental e no orçamento das gestões municipais. O presente estudo comparativo aplicado à Avenida Silvino Santos (16.200 m²), caracterizada por um fluxo misto de veículos residenciais e veículos de transporte industrial pesado, comprovou a viabilidade técnica, econômica e ambiental da substituição do revestimento em CBUQ convencional pela mistura asfáltica modificada com pó de borracha.

A aplicação prática do conceito de equivalência mecânica demonstrou que a menor espessura necessária de asfalto-borracha (3,5 cm) para alcançar o mesmo desempenho de 5,0 cm de revestimento de CBUQ convencional compensa cerca de 90% da diferença do valor de usinagem por tonelada do SICRO, estreitando o diferencial de custo inicial de execução a apenas R$ 5,56 por metro quadrado pavimentado.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

No horizonte do ciclo de vida útil de 10 anos, a durabilidade superior e a resistência à fadiga e ao trincamento térmico da mistura modificada resultam na economia líquida de R$ 69.119,86 para a administração pública municipal, além de garantir maior fluidez do tráfego ao mitigar a abertura de patologias na pista de rolamento. Sob o aspecto ambiental, a intervenção atende integralmente às diretrizes da Resolução CONAMA nº 416/2009 e à Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), promovendo a reciclagem ecológica de milhares de pneus inservíveis e consolidando um modelo eficiente de desenvolvimento urbano sustentável para Imperatriz - MA.

REFERÊNCIAS

ABNT. *NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. *Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009*. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2009.

BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Brasília, DF: Presidência da República, 2010.

CALLAI, S. C. Estudo do ruído causado pelo tráfego de veículos em rodovias com diferentes tipos de revestimentos de pavimentos. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2011.

COELHO, Johnny Gilberto Moraes. Estrada ecoeficiente: aplicação de asfalto com adição de composto madeira/borracha na região Norte do Brasil. Novos Cadernos NAEA, Belém, v. 24, n. 1, p. 185-206, 2021.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Instrução de Projeto IP-02*. Rio de Janeiro: DNER, 1981.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *DNIT 005/2003-TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia*. Rio de Janeiro: IPR, 2003.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *DNIT 112/2009-ME: Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio*. Rio de Janeiro: IPR, 2009.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO3): Tabela de Composições de Custos de Serviços Região Nordeste*. Brasília: DNIT, 2026.

ODA, S. *Viabilidade da pavimentação com asfalto borracha*. 2000. Disponível em: https://www.academia.edu/32778419.

ORÇAFASCIO. *Sistema de Orçamento de Obras. Composições Referenciais SICRO/DNIT 6416077 e 6416213*. Disponível em: https://www.orcafascio.com/.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ROMANIELLO, M.; SANTOS, A. C. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na pavimentação asfáltica: uma revisão sistemática da literatura. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES (ANPET), 35., 2021. Anais... Rio de Janeiro: ANPET, 2021.

SANCHES, Felipe G.; GRANDINI, Fernando H. B.; JUNIOR, Orlei B. *Avaliação da Viabilidade Financeira de Projetos com Utilização do Asfalto-Borracha em Relação ao Asfalto Convencional*. 2012. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2012.

SILVA, J. A.; OLIVEIRA, M. R.; SANTOS, L. F. Desempenho do asfalto borracha em pavimentações urbanas: uma revisão sistemática. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 45, n. 2, p. 123-135, 2023.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.