

ANÁLISE DO ASFALTO BORRACHA NA PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Barbara Sarabia Rodrigues – babi.sarabia@gmail.com

Henrique Viaro Paes – henrique.viaro@gmail.com

Eric Ribeiro da Silva (Orientador) – eric.silva@mackenzie.br

RESUMO

O aumento da utilização de veículos no dia-a-dia interfere diretamente na quantidade de pneus inservíveis que são descartados sem finalidade de uso no Brasil. Com isso, surgiram algumas alternativas para reciclagem da borracha, como a utilização no setor de pavimentação, incorporando a mesma ao ligante asfáltico como forma de modificação, aplicado na camada de revestimento em estradas, avenidas, etc. A presente revisão tem como enfoque a comparação de viabilidade tanto econômica, quanto técnica e ambiental da utilização do asfalto modificado por borracha proveniente de pneus inservíveis, em relação ao asfalto convencional utilizado mais comumente na pavimentação. Utilizou-se como metodologia uma revisão bibliográfica acerca do tema, analisando as características dos componentes e apresentando as propriedades dos processos de incorporação da borracha no ligante asfáltico. Por meio da comparação, foi possível identificar vantagens significativas no desempenho do asfalto modificado por borracha, o que comprovou que com a utilização desse método para pavimentação, há uma maior economia quando a longo prazo, pois suas características técnicas apresentam vantagens de durabilidade e retardo de danos causados durante o uso, além dos pontos positivos do reuso de parte dos pneus inservíveis, favorecendo o meio ambiente e a saúde pública, no geral se tornando uma alternativa viável em substituição ao asfalto convencional.

Palavras-chave: Asfalto-borracha. Pavimentação asfáltica. Viabilidade. Sustentabilidade.

ANALYSIS OF RUBBER ASPHALT IN PAVING IN BRAZIL: A LITERATURE REVIEW

ABSTRACT

The increase in the daily use of vehicles directly affects the number of useless tires that are discarded for no purpose in Brazil. As a result, some alternatives for recycling rubber emerged, such as its use in the paving sector, incorporating it into the asphalt binder as a form of modification, applied to the coating layer on roads, avenues, etc. This review focuses on comparing the economic, technical, and environmental feasibility of using rubber-modified asphalt from waste tires, in relation to the conventional asphalt most commonly used in paving. A bibliographic review on the subject

was used as methodology, analyzing the characteristics of the components and presenting the properties of the rubber incorporation processes in the asphalt binder. Through the comparison, it was possible to identify significant advantages in the performance of rubber-modified asphalt, which proved that with the use of this method for paving, there is a greater economy in the long term, as its technical characteristics have advantages in terms of durability and time delay damage caused during use, in addition to the positive points of reusing part of the waste tires, favoring the environment and public health, generally becoming a viable alternative to replacing conventional asphalt.

Keywords: Rubber asphalt. Asphalt paving. Viability. Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, são descartados cerca de 90 milhões de unidades de pneus por ano, estes quando descartados de forma irregular se tornam um grande problema ao meio ambiente e a saúde pública (SEST SENAT, 2021). As queimas acidentais ou provocadas desses pneus, geram liberação de substâncias tóxicas tanto ao ar quanto a águas superficiais, o acúmulo em corpos d'água, causam problemas como enchentes e alteração de habitat de animais da região, além do possível acúmulo de água e calor, o que os tornam criadouros de mosquitos como *Aedys Aegypti*, transmissor da dengue, chicungunha, febre amarela e zika vírus (TEIXEIRA, 2020).

Na tentativa de diminuir este descarte irregular, a Resolução Conama nº 416 (2009) estabelece que para cada pneu novo comercializado, as empresas fabricantes deverão dar destinação adequada a um pneu inservível. Além disso, evitar o descarte incorreto dos pneus possibilita a redução da exploração de matéria prima. O pneu inservível pode ser comercializado para outros setores produtivos, podendo ser empregado em gramado sintético, tapetes ou ser reutilizado como componente modificador do asfalto convencional.

A borracha do pneu inservível, pode e é utilizada no desenvolvimento do asfalto-borracha, e alguns dos seus benefícios são melhorar o desempenho, prolongar a vida-útil do pavimento, melhorar a adesividade, aumentar a consistência a elevadas temperaturas, reduzir a deformação permanente nas trilhas das rodas, aumentar a flexibilidade e retardar o aparecimento de trincas por fadiga em dias frios (MELLONE, SANTOS, SHIBAO, 2013).

A solução é usada no Brasil desde a década de 1990, mas não em grande escala. A partir do início dos anos 2000, o material passou a ser adotado em rodovias renomadas do país, como na Avenida Atlântica (RJ), Rodoanel (SP), nas vias internas da Usina de Itaipu (PR), na Avenida Beiramar Norte (SC) e no Boulevard Arruda (MG). Alguns exemplos são o Complexo Anchieta-Imigrantes, a BR-277 sentido Paranaguá e as PRs 407 e 508, que ligam ao litoral paranaense (BONAFÉ, 2021).

O uso deste material nas vias citadas acima vem sendo vantajoso devido suas condições, que indicam um menor desgaste e necessidade de manutenção. Devido a tais características podemos esperar um aumento gradativo na utilização do asfalto-borracha ao redor do território brasileiro.

Como evidenciado, estudou-se o produto gerado pela aplicação já existente do asfalto-borracha, ou seja, trata-se de uma comparação entre os pontos positivos e pontos negativos gerados da utilização de um asfalto convencional e o asfalto modificado com borracha. Ressalta-se a importância da sustentabilidade nos processos de produção do material, trazendo sucintamente a redução do impacto ambiental gerado nessa modificação.

Torna-se um assunto de enorme importância devido seu avanço tecnológico ao longo dos anos, pois como já dito, já é um produto utilizado e bastante estudado não só no Brasil, mas em outros países. Possui um grande impacto ambiental, técnico e financeiro em solo nacional, dada a imensa demanda de malhas rodoviárias e seu uso constante de tráfego tanto de pessoas quanto de cargas, o que movimenta muitos investimentos.

A presente revisão de literatura, tem como objetivo realizar uma análise comparativa e apontar as vantagens da utilização do asfalto-borracha como alternativa ao asfalto convencional avaliando sua viabilidade técnica, ambiental e econômica.

2 METODOLOGIA

Para desenvolvimento da seguinte revisão literária, foram pesquisados e estudados diversos artigos, dissertações de mestrado, teses de doutorado e trabalhos de conclusão de curso, que abrangessem o tema da utilização de pneus inservíveis na produção de asfalto modificado por borracha. A pesquisa tem caráter descritivo e comparativo entre o asfalto borracha e o asfalto convencional. Os critérios adotados para a elaboração dessa revisão se basearam em trabalhos que tragam estudos da viabilidade técnica, econômica e ambiental em casos reais de aplicação no Brasil.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL

No Brasil, a malha rodoviária lidera a matriz de transportes, e é de amplo conhecimento que a infraestrutura desta é inadequada para atender às demandas da sociedade. No entanto, para que o Estado enfrente os desafios de desenvolvimento no país, não é suficiente o comprometimento com a construção de mais vias. É imprescindível que a infraestrutura demandada seja disponibilizada em tempo hábil, de alta qualidade, tecnologicamente moderna e que também receba a manutenção adequada, assim garantindo o nível de serviço apropriado (CNT, 2021).

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2018) apenas 12,4% da malha rodoviária são pavimentadas no Brasil. No período de 2009 a 2017 a frota aumentou 63,6%, o que chega a aproximadamente 100 milhões de veículos em circulação. Neste contexto, se comparado com o aumento da frota de veículos o aumento da malha rodoviária chega a ser insignificante.

Anualmente, a CNT publica um relatório gerencial referente às rodovias brasileiras, que apresenta a situação da infraestrutura rodoviária brasileira, com o objetivo de apresentar os problemas e analisar as possíveis soluções. Com tais informações, o poder público pode ser norteado para iniciar as operações de melhorias ao transporte. Para o desenvolvimento do país é de extrema necessidade que as rodovias estejam em bom estado de conservação, o que vem a contribuir com a redução do número de acidentes, contribuindo com benefícios diretos para a sociedade.

3.2 ASFALTO 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.

Quando o asfalto se adequa a uma determinada classificação particular, que comumente se baseia em propriedades físicas que possam garantir o bom desempenho do material na obra, sua denominação passa a ser de cimento asfáltico de petróleo ou ligante asfáltico. E, quando adicionado a agregados, como brita, areia ou agentes modificadores é conhecido como mistura asfáltica (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Para essa junção entre o ligante asfáltico e seus agregados e modificadores existem meios de execução da mistura, são eles:

3.2.1 Misturas Quentes

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) com sua faixa de temperatura de usinagem em torno de 150°C a 180°C, é uma mistura entre agregados minerais com aproximadamente 95% e o cimento asfáltico de petróleo (CAP), aproximadamente 5%. Os agregados mais utilizados são as britas e o pó-de-pedra, cuja função no pavimento é a resistência mecânica e estabilidade da mistura. Já o CAP convencional o qual é classificado de acordo com a sua consistência medida por penetração de agulha a 25°C (CAP 30/45, CAP 50/70, entre outros) em décimos de milímetro, tem

função de promover a aglutinação, flexibilidade, impermeabilidade e durabilidade da mistura asfáltica (BRITA PINHAL, 2017).

3.2.2 Misturas Mornas

As misturas mornas referem-se a tecnologias desenvolvidas para reduzir as temperaturas durante a usinagem e compactação das misturas asfálticas em campo. Essas temperaturas podem ser reduzidas de 30°C a 50°C, o que traz benefícios ao meio ambiente, aos trabalhadores, à vida útil do revestimento asfáltico e também para a logística de engenharia necessária na construção das vias (SINICESP, 2016).

3.2.3 Misturas Frias

No pré misturado a frio (PMF), a emulsão asfáltica, que é uma dispersão do CAP em fase aquosa estabilizada com tensoativos, une os agregados graúdos e miúdos com manuseio à temperatura ambiente. Nas misturas frias podem ser utilizados agregados úmidos, ao contrário das misturas a quente onde é necessário a secagem dos materiais pétreos para que haja a aderência do ligante com os agregados. De acordo com a origem mineral do agregado se torna necessário adicionar cal para que haja adesividade com o CAP (BRITA PINHAL, 2017).

Segundo Brita Pinhal (2017), o PMF é cerca de 50% mais barato do que o CBUQ, o que varia conforme a região do Brasil. Dessa forma, a escolha entre um ou outro depende das características da obra. Uma mistura asfáltica a quente apresenta maior qualidade e maior resistência em relação a mistura a frio. Já o PMF com um traço definido e bem projetado, pode se tornar uma melhor alternativa para vias com baixo volume de tráfego. As misturas frias necessitam de um maior volume de vazios para que a água evapore, o que as tornam mais sensíveis a ação da água e ar, havendo maior desgaste ao uso e envelhecimento acelerado quando comparado ao CBUQ.

Dentre essas misturas, a mistura quente é a mais utilizada, devido à sua alta resistência mecânica, mas em contrapartida causa graves impactos ambientais.

3.3 ASFALTO BORRACHA

A utilização de borracha de pneus inservíveis, incorpora benefícios e reduz problemas ambientais, quando utilizada no desenvolvimento de asfalto borracha. O descarte de pneus é um problema para a sociedade, dessa forma, a utilização deles em pavimentação tem sido uma das técnicas mais utilizadas no mundo, já que é usado em larga escala e traz melhorias as misturas asfálticas em vários aspectos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo Mozart e Rihs (2018), a incorporação de pneus inseríveis ao asfalto consegue cumprir com o seu objetivo de melhorar as propriedades do pavimento, aumentando a durabilidade e

o desempenho, além de contribuir com o meio ambiente. As propriedades da borracha trazem melhorias a qualidade do ligante asfáltico, resultam em um aumento de flexibilidade e tornam a mistura mais resistente ao envelhecimento e ao aparecimento de deformações e trincas. Pode-se citar também, o aumento da segurança dos usuários nas vias, quando comparada ao uso do asfalto convencional. Além de proporcionar vantagens ecológicas, ambientais e sociais, pela destinação adequada aos pneus inservíveis.

Cabe ressaltar, que o processo de mistura do asfalto-borracha com os agregados minerais e a aplicação do concreto asfáltico são semelhantes aos procedimentos utilizados em misturas com ligantes convencionais, exceto em relação às temperaturas. No asfalto-borracha as temperaturas de mistura e de compactação são mais elevadas devido a maior viscosidade do asfalto-borracha (ROSENO, 2005). Essa elevada temperatura para aplicação de asfaltos é um fator de risco à saúde dos trabalhadores, além de causar mais poluição ao meio ambiente, despejando gases indesejáveis no meio ambiente.

A borracha de pneu moída pode ser utilizada tanto como modificador do asfalto, quanto como agregado em misturas asfálticas. A incorporação desta borracha às misturas asfálticas pode ser realizada de duas formas principais: mediante processo úmido e processo seco (OLIVEIRA NETO, 2016).

3.3.1 Processo Úmido

O asfalto-borracha produzido pela via úmida é a combinação de um cimento asfáltico convencional, borracha granulada reciclada e caso seja necessário, outros aditivos. A borracha granulada de pneus é misturada ao cimento asfáltico convencional aquecido para haver o amolecimento das partículas de borracha antes do uso. Os aditivos são normalmente óleos extensores, que buscam melhorar a trabalhabilidade dos asfaltos-borracha ou melhorar a compatibilidade entre o ligante e a borracha (PILATI, 2008).

No processo úmido, o ligante asfáltico é aquecido a aproximadamente 190°C, em um tanque de superaquecimento em condições herméticas, e em seguida, levado para um tanque de mistura apropriado. Neste tanque é feita a adição da borracha moída ao ligante convencional, com misturação de 1 a 4 horas a uma determinada temperatura (PILATI, 2008). O equipamento misturador deve possuir um sistema para controlar a temperatura e o tempo de reação de maneira constante e mais uniforme possível, além de um sistema de agitação que evite a segregação das partículas de borracha. A quantidade de borracha incorporada ao cimento asfáltico pelo processo úmido varia de 5 a 25% em peso em relação ao cimento asfáltico, geralmente com partículas inferiores a 2 mm (FAXINA, 2002).

Comumente, a preparação do ligante modificado com borracha é *just in time*, ou seja, preparada no próprio canteiro de obras e utilizada imediatamente. No Brasil está sendo utilizado o processo via úmida através do *terminal blending*, onde a mistura é efetuada em um local apropriado fora do canteiro de obras e transportada até o local de aplicação (SPECHT, 2004). A interação entre borracha moída e ligante asfáltico no processo úmido, é classificada como uma reação. São vários fatores que influenciam no grau de modificação do ligante, como a textura e granulometria da borracha, a proporção entre ligante e borracha, o uso de aditivos, o tempo e temperatura da reação e a compatibilidade com a borracha (ODA, 2000).

3.3.2 Processo Seco

No processo seco, a borracha triturada é colocada na mistura como parte dos agregados, que em conjunto do ligante produz o “agregado-borracha”. A mistura pela via seca deve apenas ser utilizada em misturas a quente (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Neste processo, o agregado é aquecido a temperaturas de aproximadamente 200°C, quando então, a borracha é adicionada e processa-se a mistura por um tempo próximo de 15 segundos, ou até a formação de uma mistura homogênea agregado-borracha. Na sequência, é adicionado o ligante betuminoso a esta mistura por meio de processos convencionais de usinagem. (SILVA, MARQUES, 2018). Nesse processo se insere de 3 a 5% de borracha em relação à massa total de agregados minerais, as partículas variam de 1,6 a 6,4mm. A quantidade de borracha consumida nesse processo chega a ser 2 a 4 vezes maior que pelo processo úmido (FAXINA, 2002).

No processo seco as dimensões das partículas de borracha são superiores as utilizadas no processo úmido. Do mesmo modo, a borracha granulada substitui uma parcela da mistura dos agregados minerais, funcionando como um material inerte. Segundo Faxina (2002) o processo seco é limitado à aplicação em revestimento asfáltico, já o processo úmido permite ser empregado em tratamentos superficiais, camadas de ligação, selagem de trincas e concreto asfáltico.

Os produtos finais obtidos pelos dois processos são denominados de agregado-borracha quando obtido pelo processo seco e asfalto-borracha pelo processo úmido.

3.4 VIABILIDADE TÉCNICA

Segundo Specht e Ceratti (2003), o asfalto-borracha possui vantagens técnicas quando comparado aos ligantes convencionais, são elas:

- Maior ductibilidade (propriedade que representa o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura);
- Retardo no tempo de reflexão das trincas;

- Melhor aderência;
- Resistência ao envelhecimento;
- Redução do nível de ruído.

A resistência ao envelhecimento citada, se dá devido aos antioxidantes e carbono encontrados na borracha dos pneus (ODA, FERNANDES JÚNIOR, 2001).

As partículas de borracha, quando inseridas pelo processo via úmida, aumentam em volume porque absorvem certos óleos aromáticos contidos no cimento asfáltico, o que proporciona ao ligante modificado uma maior ductibilidade, maior viscosidade, menor suscetibilidade térmica, resistência ao envelhecimento e maior resistência a fissuração (SPECHT, CERATTI, 2003).

Embora os benefícios da inserção da borracha por via seca, serem menores quando comparados ao processo via úmida, ainda pode-se citar a melhora das propriedades estruturais do ligante em estabilidade, vida de fadiga, módulo de resiliência e menor susceptibilidade a deformação permanente (SPECHT, CERATTI, 2003).

A Greca Asfaltos (2009), realizou alguns estudos comparativos no Campus do Vale da UFRGS em Porto Alegre, entre asfalto convencional e asfalto borracha. No primeiro deles foram construídas pistas experimentais, identificadas na Figura 1, a pista da direita foi feita com asfalto convencional CBUQ e a da esquerda com asfalto borracha. Nos dois trechos foi aplicado um simulador de tráfego linear DAER/UFRGS, com objetivo de avaliar os resultados. Foi utilizado uma carga de eixo de 10tf, a imagem mostra a pista com asfalto borracha após 123.356 ciclos, com apenas uma trinca, e a pista com asfalto convencional após 90.303 ciclos trincada por completo.

Figura 1 - Simulador de tráfego de campo.



Fonte: Greca Asfaltos (2009).

O estudo realizado pela Greca Asfaltos (2009) também avaliou o comportamento em relação a deformação permanente, em duas placas confeccionadas por asfalto convencional e asfalto borracha. O ensaio foi realizado através do simulador *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* –

LCPC. Na Figura 2 a seguir, pode-se observar que a placa da direita com asfalto borracha deformou 5% após 30.000 ciclos de simulação e a placa da esquerda confeccionada com ligante convencional deformou 13% após apenas 10.000 ciclos.

Figura 2 – Placas após simulador LCPC (laboratório).



Fonte: Greca Asfaltos (2009).

Após análise, percebe-se que o desempenho técnico do asfalto modificado com borracha em relação ao asfalto convencional é superior, o que definiu uma maior vida útil desse recurso e uma necessidade menor de manutenção ao longo do tempo, comparado aos asfaltos convencionais.

Em outro estudo, desempenhado por Sanches, Grandini e Baierle Junior (2012), foi analisada a Rua Ângelo Domingos Durigan, situada em Curitiba. Nesta foi realizada uma obra de recapeamento em 2005, utilizando o asfalto convencional CAP 50/70 e o asfalto borracha AB8. Durante a execução da via, a base do pavimento foi mantida, sendo a única diferenciação os 5cm finais das camadas.

Após 7 anos, em 2012, foram mostrados os resultados comparando as principais patologias encontradas. Foram selecionados 200m de via que dividem os dois tipos de pavimento, ou seja, 100m de cada tipo de revestimento, com o objetivo de obter o tráfego mais semelhante possível, além de que se pode citar que durante estes anos a rua em questão estava suscetível a mesma condição climática.

A relevância do estudo se volta justamente para a análise do mesmo trecho com as mesmas influências de tráfego, variações térmicas e susceptíveis aos mesmos efeitos de uso.

Na Figura 3 e na Figura 4, é possível perceber que o trecho com asfalto convencional desenvolveu um alto número de trincas, já na Figura 5 e Figura 6, visualiza-se o trecho produzido com asfalto-borracha e este não apresenta defeitos visíveis.

Figura 3 - Trincas Ligadas Asfalto Convencional.



Fonte: Sanches, Grandini, Baierle Junior (2012).

Figura 4 – Trincas Interligadas Asfalto Convencional.



Fonte: Sanches, Grandini, Baierle Junior (2012).

Figura 5 – Trecho sem Defeitos Asfalto Borracha.



Fonte: Sanches, Grandini, Baierle Junior (2012).

Figura 6 – Trecho sem Defeitos Asfalto Borracha.



Fonte: Sanches, Grandini, Baierle Junior (2012).

Observando os dois trechos em questão, é possível verificar que o asfalto convencional sofreu maiores danos e desgaste em relação ao asfalto-borracha. Como já dito, os trechos foram estudados sob a ação dos mesmos intempéries, dessa forma associa-se esse desgaste ao material utilizado.

Sendo assim, os autores concluem que após os 7 anos de utilização da via em estudo, através da análise visual, aproximadamente 70% do trecho com CAP-50/70 sofreu algum tipo de manutenção, enquanto o asfalto-borracha precisou somente de 10% de reparo.

3.5 VIABILIDADE AMBIENTAL

Do ponto de vista ambiental, é possível apresentar pontos positivos e pontos negativos. Alguns pontos tratados a seguir demonstram algumas características que tratam da comparação da viabilidade ambiental tanto no processo de reuso dos pneus descartados como na produção do asfalto modificado que possui em seu processo de fabricação, métodos que são prejudiciais ao meio ambiente, assim como no asfalto convencional.

Como ponto positivo pode-se citar a economia dos recursos naturais, proporcionada pela reciclagem dos pneus, pelo menor uso de combustível não renovável (ex: carvão, óleo) devido ao poder calorífico do pneu (SANTOS, BOTINHA, LEAL, 2013) e pela redução da demanda de petróleo e asfalto ao substituir uma parte do asfalto por borracha, além de ter uma maior durabilidade e maior vida útil, reduzindo manutenções (NOHARA *et al*, 2005).

É possível citar também que os riscos de incêndio e desastres ambientais seriam reduzidos. De acordo com Beduschi (2014) esses problemas são derivados dos descartes dos pneus em locais irregulares assim podendo obstruir rios e lagos, além de ficarem expostos em solo sofrendo degradação.

Analogamente pode-se citar o risco de proliferação de doenças, como por exemplo, a dengue e o zika vírus, isto devido ao acúmulo de lixo e água no ambiente onde os pneus são descartados, e inclusive neles mesmos.

Com a inclusão da borracha como agente modificador do asfalto, temos a diminuição da quantidade de petróleo utilizado, sendo assim um ponto considerável para a saúde do meio ambiente de acordo com Santos, Botinha e Leal (2013).

Por outro lado, também existem os impactos negativos nesse acréscimo da borracha na modificação do asfalto, e segundo Fortes (2014), os principais são o aumento da emissão de gases poluentes que podem ser mutagênicos e cancerígenos e assim nocivos à saúde humana, o forte odor provocado pela digestão da borracha, no processo de modificação do CAP com borracha e na aplicação do produto na pista e a emissão de fumaça gerada pelo uso de altas temperaturas na hora da fabricação do asfalto modificado.

3.6 VIABILIDADE ECONOMICA

Um dos principais aspectos estudados no início da fabricação do asfalto modificado com borracha como meio alternativo para melhorar algumas características do asfalto convencional, foi o estudo da viabilidade econômica trazendo a comparação de gastos na produção de ambos os asfaltos para que além de trazer aspectos técnicos, torne a modificação do asfalto com borracha mais vantajosa financeiramente.

O aspecto econômico não se resume apenas ao gasto inicial que o asfalto-borracha terá comparado ao asfalto convencional, todo o processo de produção, aplicação e manutenção deve ser levado em consideração ao comparar ambos.

Algumas análises a seguir, mostram estudos realizados em vias brasileiras demonstrando o investimento inicial da modificação do asfalto com borracha, alguns custos dos processos de fabricação e seu custo final, assim podendo comparar com o custo de manutenção das vias após alguns anos de utilização.

A Tabela 1 apresenta uma comparação do custo com a quantidade do revestimento asfáltico convencional e o revestimento asfáltico modificado com borracha gerando um custo total de obra de ambos os revestimentos. Já na Tabela 2, é indicado o custo de manutenção e o custo de execução das massas asfálticas.

Tabela 1 - Tabela comparativa revestimento convencional x revestimento asfalto-borracha.

GRANDEZAS		CÁLCULO	UNIDADE	TIPO DE ASFALTO	
				CAP 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 de asfalto no CBUQ	A x D x E	R\$	1.509.375,00	1.566.468,75
G	Custo total de obra	C + F	R\$	6.759.375,00	5.792.718,75

Fonte: Greca Asfaltos (2009).

Tabela 2 - Custo de manutenção + execução revestimento convencional x revestimento asfalto-borracha.

GRANDEZAS		CÁLCULO	UNIDADE	TIPO DE ASFALTO	
				CAP 50/70	ASFALTO BORRACHA (ECOFLEX)
A	Execução do pavimento com preparo de base em extensão		m	200	200
B	Custo de execução do pavimento com preparo de base		R\$ / m ²	46,66	77,22
C	Manutenção do pavimento no período de 7 anos		% m ²	70%	10%
D	Custo geral da manutenção do pavimento		R\$ / m ²	67,30	67,30
E	Percentual de custo x manutenção do pavimento	C x D	R\$ / m ³	47,11	6,73
F	Custo de execução + manutenção do pavimento	B + E	R\$ / m ²	93,77	83,95

Fonte: Zatarini *et al.*, (2017).

Analogamente foi estudada a análise de custo de uma obra de restauração de 30 km de extensão em que o projeto especifica a aplicação de uma camada de concreto asfáltico com ligante CAP-50/70 de 5 cm de espessura. Na Tabela 3 e Tabela 4 é apresentado o orçamento de um revestimento com Asfalto Borracha com redução de espessura de 30%, ou seja, com 3,5 cm de reforço de acordo com dados do Greca Asfaltos (2009).

Tabela 3- Quantidade de massa asfáltica produzida.

Revestimento em CBUQ convencional	Revestimento em CBUQ com asfalto borracha com redução de 30%
30.000m x 7,00m x 0,05m x 2,5 t/m ³ = 26.250 toneladas de massa asfáltica de CBUQ normal	30.000m x 7,00m x 0,035m x 2,5 t/m ³ = 18.375 toneladas de massa asfáltica de CBUQ com asfalto borracha

Fonte: Greca Asfaltos (2009).

Temos assim:

Tabela 4 – Custo do asfalto por tonelada.

CBUQ com CAP 50/70	R\$ 200,00 por tonelada
CBUQ com Asfalto borracha	R\$ 230,00 por tonelada

Fonte: Greca Asfaltos (2009).

Segundo a Greca Asfaltos (2009, p.08):

Observa-se, portanto, um preço de execução de Asfalto Borracha em torno de 15% mais caro que o preço de execução de CBUQ convencional. Essa majoração remunera os custos para elevar as temperaturas de usinagem da mistura asfáltica e para aumentar a eficiência na compactação do revestimento.

As premissas adotadas para tal conclusão foram:

- o preço do CAP-50/70 de R\$1.150,00/tonelada;
- o preço do asfalto-borracha de R\$1.550,00/tonelada;
- frete não incluso;
- devido a maior viscosidade do asfalto-borracha, considera-se o aumento de teor do ligante em 0,5%. (GRECA ASFALTOS, 2009).

Conclui-se que na pesquisa apresentada, ocorre uma redução de aproximadamente 14% no custo total da obra, além de apresentar menor manutenção.

Para fins de comparação, temos outro estudo realizado em Goiânia no ano de 2019 referente à pavimentação de um trecho de um residencial denominado o Residencial Jardim do Cerrado III, também comparando o uso do asfalto convencional e o asfalto modificado por borracha derivada de pneus inservíveis.

Neste estudo, Mendes (2019) considera a mesma espessura (3cm) de revestimento para os dois tipos de asfalto. Dessa forma, inicia-se a comparação se baseando em uma mesma quantidade de

massa asfáltica, assim na Tabela 5 temos os custos envolvidos na usinagem e aplicação, totalizando o custo para execução dos dois tipos de asfalto, convencional CAP 50/70 e asfalto-borracha AB22.

Tabela 5 – Custos de usinagem/aplicação e custos totais.

GRANDEZAS		CÁLCULO	UNIDADE	TIPO DE ASFALTO	
				CAP 50/70	ASFALTO BORRACHA (AB22)
A	Quantidade de massa asfáltica CBUQ		ton	5.013,26	5.013,26
B	Custo de Usinagem 20% do CAP		R\$ / ton	371,50	420,04
C	Quantidade de massa x Custo de Usinagem	A x B	R\$	1.862.426,09	2.105.769,73
D	Custo do CAP		R\$ / ton	1.857,50	2.100,2
E	Custo de asfalto no CBUQ	A x D	R\$	9.312.130,45	10.528.848,65
F	Custo total de obra	C x D	R\$	11.174.556,54	12.634.618,38

Fonte: Mendes (2019).

Observando a Tabela 5, chega-se à conclusão de que o custo total para produção e execução do asfalto-borracha é 13,07% mais caro que o convencional. Porém é necessário avaliar os custos a longo prazo, sendo assim na Tabela 6 notamos os custos de manutenção realizados nestas mesmas vias do Residencial Jardim do Cerrado III durante 7 anos de utilização.

Tabela 6 – Custos de execução e manutenção durante 7 anos.

Tipo de Asfalto	Custo de Execução (R\$)	Manutenção em %	Custo de Manutenção (R\$)	Custo de Execução e Manutenção (R\$)
Asfalto Convencional	11.174.556,54	70	7.882.189,59	19.056.746,15
Asfalto Borracha	12.634.618,38	10	1.263.461,84	13.898.080,22

Fonte: Mendes (2019).

Conclui-se que no total existe um custo de 37,12% maior para execução e manutenção do asfalto convencional no período de 7 anos. Baseando-se em uma viabilidade econômica, contata-se que o asfalto-borracha tem seu custo diminuído durante sua vida útil, devido a sua baixa necessidade de manutenção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com as informações apresentadas no corpo dessa revisão, foram obtidos alguns resultados importantes para uma análise geral de comparação entre o uso do asfalto convencional e o asfalto

modificado com borracha proveniente de pneus inservíveis em relação ao seu custo inicial, de manutenção, seu impacto ao meio ambiente, além de diferenças técnicas entre ambos.

Olhando para parte sustentável, temos como principal benefício a reutilização de um material bastante nocivo para o meio ambiente quando descartado de forma incorreta. Como já citado, os pneus descartados de forma incorreta podem trazer uma série de problemas, tais como a proliferação de doenças, como a dengue, o risco de incêndio, desastres ambientais e o longo período de degradação do material, alavancando uma deterioração do solo. Por outro lado, temos alguns pontos negativos na execução do asfalto- borracha que geram danos ao meio ambiente e à saúde da população, a maioria deles proveniente no momento da mistura da borracha ao asfalto com temperaturas elevadas, gerando gases prejudiciais, odores fortes e uma quantidade considerável de fumaça.

Tendo em vista essa revisão literária, foi possível perceber que a inserção da borracha ao asfalto se torna prejudicial devido seus impactos momentâneos, porém a longo prazo existem inúmeros problemas ambientais que gradativamente se majoram, como, a proliferação de doenças, os riscos ao meio ambiente pela decomposição do material ao ar livre, etc., o que nos leva a situações mais críticas.

Utilizando todas as informações de custo provenientes dos dados reais de aplicação que foram apresentados nessa revisão, temos como resultado um gasto inicial da modificação do asfalto com borracha maior do que o gasto inicial do asfalto convencional podendo ressaltar um acréscimo de aproximadamente 13 a 15% superior no custo de usinagem/aplicação por tonelada da massa asfáltica. Porém quando olhamos a longo prazo, pensando na manutenção destas vias, foi observado uma diminuição no custo do asfalto somado com o custo de manutenção ao longo do tempo.

Dessa forma, devido as características da borracha, o asfalto modificado acaba ganhando um aumento da consistência e da flexibilidade, tornando a mistura mais resistente ao envelhecimento, ao aparecimento de deformações e trincas trazendo uma economia significativa no tempo e gasto para manutenção do pavimento, o que o torna mais vantajoso comparado ao asfalto convencional tanto financeiramente quanto tecnicamente.

Visto que o transporte rodoviário continua sendo o mais utilizado no país, as vantagens se tornam ainda mais relevantes, principalmente porque diminuem a necessidade de manutenções, o que no Brasil atualmente, seria um investimento a longo prazo positivo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se perceber que ao incorporar a borracha de pneus inservíveis como agente modificador do asfalto, suas características técnicas foram aperfeiçoadas proporcionando maior resistência, durabilidade e elasticidade quando comparadas as do asfalto convencional.

Além dos benefícios técnicos, temos que o asfalto borracha possui um custo de 13 a 15% mais

caro, um custo inicial de implantação devido seus métodos de produção. Porém se tratando de manutenção ao longo do tempo sabendo das vantagens técnicas adquiridas, resulta-se em uma diminuição de aproximadamente 37%, segundo Mendes (2019), concluindo-se assim ser financeiramente mais vantajoso do que o asfalto convencional.

É importante ressaltar, que o objetivo dos comparativos, não serve apenas para demonstrar as vantagens e benefícios que o asfalto-borracha proporciona, e sim conscientizar a sociedade a respeito do descarte inadequado dos pneus inservíveis, trazendo a relevância do estudo e identificando que é possível investir nesse caminho.

Como se trata de um tema relevante, essa revisão abre caminhos para que futuramente sejam estudados novos meios de aplicação do asfalto-borracha na pavimentação brasileira, buscando cada vez mais utilizar todas as características positivas que a borracha oferece na modificação do asfalto e conjuntamente abrangendo a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

BEDUSCHI, Eliane Fátima Strapazzon. **Utilização de pneus inservíveis na composição da massa asfáltica**. Universidade do Oeste de Santa Catarina, Santa Catarina, 2014.

BERNUCCI, B.L. et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2008.

BONAFÉ, Gabriel. **Asfalto-borracha garante vias mais seguras e duráveis**. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/asfalto-borracha-garante-vias-mais-seguras-e-duraveis/15935>. Acesso em 3 nov.2021.

BRITA PINHAL. **CBUQ x PMF: Você sabe a diferença?**. Disponível em: <http://britapinhal.com.br/novidades/detalhes/6/cbuq-x-pmf-voce-sabe-a-diferenca>. Acesso em: 8 nov. 2021.

Confederação Nacional dos Transportes (CNT). **Somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada**. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentada>. Acesso em: 19 out. 2021.

Confederação Nacional dos Transportes (CNT). **Infraestrutura De Transporte Investimento E Financiamento De Longo Prazo**, 2021.

FAXINA, A. L. **Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante do tipo asfalto-borracha**. 2002. 338p. Dissertação (Mestrado em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos-EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos. FORTES, R. M. Asfalto borracha: vantagens e desvantagens. In: WORKSHOP DE SMS DO SEGMENTO DA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA, 2014, Rio de Janeiro.

GRECA ASFALTOS. **Linha ECOFLEXPAVE**. 2009. Disponível em: http://www.flexpave.com.br/leiamais_ecoflex/13_estudo_ecoflex_2009.pdf. Acesso em: 18 out. 2021.

MELLONE, G.; SANTOS, M. R.; SHIBAO, Y. F. **Pavimentação de rodovias com a utilização de resíduos de pneus inservíveis.** Revista Eletrônica Gestão e Serviços v3, n.2/v4, n.1, pp. 489-508, Jan/jun. 2013.

MENDES, G. C. R. **Viabilidade Do Asfalto Borracha Na Pavimentação Urbana: Estudo De Caso No Residencial Jardim Do Cerrado III, Goiânia, Goiás.** Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Planejamento Territorial - MDPT) 2019. – Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC-GO.

MOZART, W.; RIHS, A. R. **Asfalto-Ecológico: Desafios E Soluções.** Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro – Unipac ISSN 2178-6925, 2018.

NOHARA, J. J. et al. GS-40 – **Resíduos sólidos: passivo ambiental e reciclagem de pneus.** **THESIS**, São Paulo, ano 1, v .3, p. 21-57, 2º Semestre, 2005.

ODA, S. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação.** 2000. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos.

ODA, S.; FERNANDES JÚNIOR, J.L. **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação.** Acta Scientiarum (UEM), Maringá, v. 23, 1589-1599 f., 2001.

OLIVEIRA NETO, D. M. **Uso Da Borracha De Pneus Para Pavimentação Asfáltica No Brasil: Um Panorama Histórico.** [s.l.: s.n.], 2016. Disponível em: https://tga.blv.ifmt.edu.br/media/filer_public/04/c8/04c8ceb6-dd71-40a1-9876-1730305ee679/diocelde_marques_de_oliveira_neto_-_uso_da_borracha_de_pneus_para_pavimentacao_asfaltica_no_brasil_um_panorama_historico.pdf. Acesso em: 19 nov. 2021.

PILATI, F. **Análise Dos Efeitos Da Borracha Moída De Pneu E Do Resíduo De Óleo De Xisto Sobre Alguma Propriedades Mecânicas De Misturas Asfálticas Densas, 2008.** [s.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-14062008-202738/publico/PILATI2008.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2021.

ROSENO, J. L. **Avaliação de uma Mistura Asfáltica Porosa com Agregados Calcários e Asfalto-borracha.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) 2005. – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SANCHES, F. G.; GRANDINI, F. H. B.; BAIERLE JUNIOR, O. **Avaliação Da Viabilidade Financeira De Projetos Com Utilização Do Asfalto-Borracha Em Relação Ao Asfalto Convencional.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná, 2012.

SANTOS, L. A. A.; BOTINHA, R. A.; LEAL, E. A. **A Contribuição Da Logística Reversa De Pneumáticos Para A Sustentabilidade Ambiental.** RACE: Unoesc, v. 12, n. 2, p. 339-370, jul./dez. 2013.

SEST SENAT. Sestsenat.org.br. Disponível em:
<https://www.sestsenat.org.br/imprensa/noticia/cerca-de-450-mil-toneladas-de-pneus-sao-descartados-por-ano-no-brasil>. Acesso em: 25 out. 2021.

SILVA, A. S., MARQUES, V. P. **Estudo Comparativo Entre O Cbuq Convencional E O Cbuq Com Adição Do Pó De Borracha Anápolis / Go 2018.** [s.l.: s.n., s.d.]. Disponível em:
http://repositorio.aee.edu.br/bitstream/aee/68/1/2018_1_TCC_Anngelita%20e%20Vanessa.pdf. Acesso em: 21 nov. 2021.

SINICESP. **Produção de Misturas Asfálticas Mornas com Agente Surfactante no Brasil, 2016.** Sinicesp.org.br. Disponível em: <<http://www.sinicesp.org.br/materias/2016/bt08a.htm>>. Acesso em: 21 nov. 2021.

SPECHT, L.P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 279 p. Porto Alegre. 2004

SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. **Asfalto-borracha e borracha-agregado: Possibilidades de utilização de borracha reciclada em misturas asfálticas.** Revista Estradas do DAER, Porto Alegre, ano 2, nº 4, p. 18-26, julho. 2003.

TEIXEIRA, J. N. **Estudo Comparativo Entre Asfalto Modificado Com Borracha De Pneus Inservíveis E Asfalto Convencional.** Revista Científica Pro Homine, v. 2, n. 1, p. 17-32, 19 fev. 2020.

ZATARINI, A.P. M. et al. **Viabilidade Da Pavimentação Com Asfalto Borracha.** Revista Gestão Sustentável Ambiental. Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 649-674, out.2016/mar. 2017