



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
PARÁ**

**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA  
CIVIL**



**ENOCK AKODEDJRO**

**O ASFALTO BORRACHA NO BENIM: ESTUDO  
BIBLIOGRÁFICO, DE VIABILIDADE E DESEMPENHO  
ESTRUTURAL.**

**BELÉM – PA  
2024**

**O ASFALTO BORRACHA NO BENIM: ESTUDO  
BIBLIOGRÁFICO, DE VIABILIDADE E DESEMPENHO  
ESTRUTURAL.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador: Prof. Dr. Marcelo  
Figueiredo Massulo Aguiar**

**Orientando: Enock Akodedjro**

**BELÉM-PA  
2024**

**ENOCK AKODEDJRO**


**O ASFALTO BORRACHA EM BENIM: ESTUDO  
BIBLIOGRÁFICO, DE VIABILIDADE E DESEMPENHO  
ESTRUTURAL.**

Belém, 8 de fevereiro de 2024

Prof. Dr Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar  
Dr. pela UFPA  
Orientador

**BANCA EXAMINADORA**

**Aprovado por:**

Documento assinado digitalmente  
 **MARCELO FIGUEIREDO MASSULO AGUIAR**  
Data: 08/02/2024 11:08:23-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar**


Orientador – Universidade Federal do Pará – UFPA

Documento assinado digitalmente  
 **CHRISTIANE LIMA BARBOSA**  
Data: 08/02/2024 11:18:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Christiane Lima Barbosa**

Examinadora Interna – Universidade Federal do Pará – UFPA

Documento assinado digitalmente  
 **MARCUS VINICIUS GUERRA SERAPHICO DE ASSI**  
Data: 09/02/2024 09:07:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Marcus Vinicius Guerra Seraphico de Assis Carvalho**

Examinador Interno – Universidade Federal do Pará – UFPA

**CONCEITO FINAL: EXCELENTE**

## AGRADECIMENTOS

Ao concluir meu Trabalho de Graduação, expresso minha gratidão não apenas àqueles que estiveram diretamente envolvidos, mas a todos que contribuíram de maneira geral para a conclusão deste curso.

Quero agradecer à minha família ao meu pai Faustin Akodedjro, minha mãe Djogbo Euphrasie Kiti, aos meus irmãos: Eunice Akodedjro, Pascal Akodedjro, Ruth Akodedjro, Caleb Akodedjro e Sidonie Akodedjro (*in memoriam*) cujo apoio e estímulos foram constantes em todas as fases da minha vida acadêmica, inclusive em momentos em que eu enfrentava desafios e dificuldades, eles estavam sempre presentes mesmo com a distância e a saudade para oferecer o suporte e incentivo necessário, demonstrando amor e carinho.

À universidade Federal Do Pará, pelas oportunidades e pessoas as quais tive o prazer de compartilhar conhecimentos e experiências.

À minha companheira Bruna Farias, agradeço pelo companheirismo, conselhos e por ser o meu ombro amigo ao longo de toda a jornada até esta conquista.

Aos meus colegas estrangeiros e novos amigos que surgiram por aqui nesta estadia, agradeço pelo constante incentivo e motivação desde os primeiros momentos.

Aos meus colegas de turma e amigos de turma, que se tornou mais que simples colegas de curso, se tornaram meus amigos de profissão, os quais têm muita confiança e gratidão. Todos nossos “estudão da salvação” na véspera de cada prova ou de preparação para apresentações de trabalho. Especialmente o grupo de “**Trabalhos Feitos**” apesar dos desafios que enfrentamos, reconheço que sempre tivemos um propósito significativo, e estou ciente de que me esforcei ao máximo em prol do bem maior. Salvaram-me diversas vezes de disciplinas que seriam quase inimagináveis a minha aprovação.

Agradeço aos profissionais da **ConstruCode SA**, onde realizei meu estágio e absorvi conhecimento valioso de diversas pessoas, contribuindo significativamente para o meu desenvolvimento profissional e intelectual.

Expresso minha gratidão ao Prof. Dr. Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar, meu orientador, por aceitar-me como orientando, me orientar de maneira excepcional e proporcionar o conhecimento na área de pavimentação. Serei sempre grato pela sua contribuição.

Quero expressar minha profunda gratidão ao programa PEC-G pela oportunidade, ao SAEST, PROINTER e ao AEE UFPA pelo apoio fundamental ao longo da minha graduação. O PEC-G foi essencial para minha experiência acadêmica internacional, enriquecendo meu aprendizado. Ao SAEST, PROINTER e AEE UFPA, agradeço pela assistência acadêmica,

suporte e orientação que permitiram superar desafios e alcançar este objetivo acadêmico. Essas instâncias foram pilares essenciais, oferecendo recursos e oportunidades que positivamente moldaram minha trajetória educacional e todo o apoio durante esses anos de estudo.

“Você pode sonhar, criar, desenhar e construir o lugar mais maravilhoso do mundo. Mas é necessário ter pessoas para transformar seu sonho em realidade.”

Walt Disney

## **O ASFALTO BORRACHA EM BENIM: ESTUDO BIBLIOGRÁFICO, VIABILIDADE E DESEMPENHO ESTRUTURAL.**

AKODEDJRO, E. O asfalto borracha em Benim: Estudo bibliográfico, viabilidade e desempenho estrutural, 2024. 48 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém.

### **1. RESUMO**

O crescimento do volume de tráfego, do peso e das dimensões dos veículos tem exigido novas soluções nos projetos rodoviários, dentre as quais se destaca a utilização de asfalto borracha. Apesar dos benefícios do asfalto borracha, ele ainda é pouco utilizado, sobretudo nos países em desenvolvimento, ou seja, embora as potencialidades do asfalto-borracha sejam amplamente reconhecidas, sua aplicação em países em desenvolvimento, como o Benim. Portanto, o objetivo do trabalho é verificar a viabilidade da aplicação de asfalto borracha no Benin. Para tanto, foi efetuada uma pesquisa bibliográfica abordando aspectos como: a história, processos de produção, explorando a aplicação global do asfalto borracha, a caracterização específica de Benim e questões de viabilidade econômica, ambiental e técnica do uso de asfalto borracha. De acordo com as pesquisas realizadas constatou-se que o asfalto borracha apresenta como principais vantagens: durabilidade, maior resistência e menor necessidade de manutenções e como desvantagens relevantes: exige maior controle tecnológico, maior custo e requer a mão de obra altamente qualificada. Em termos de custo, estudos indicam que ele varia entre 15-20% mais caro para ser executado, porém traz economia de 60% no longo prazo quando se consideram os custos de manutenção. Constatou-se também que há relatos de aplicação de asfalto borracha em diferentes países com condições climáticas bastante diversas. Face ao exposto, conclui-se como viável a aplicação do asfalto borracha nas principais rodovias do Benin, com a ressalva de que há necessidade de treinamento e qualificação das empresas executoras e mão-de-obra.

**Palavras-chave:** Asfalto-Borracha; Sustentabilidade; Pavimentação.

## **LE BITUME CAOUTCHOUC AU BENIN: ETUDE DE BIBLIOGRAPHIQUE, FAISABILITÉ E PERFORMANCE STRUCTURELLE**

AKODEDJRO, E. L'asphalte caoutchouc au Bénin : Étude bibliographique, viabilité et performance structurelle, 2024. 48 pages. Mémoire de diplôme (Licence en génie civil) - Faculté de génie civil, Université fédérale du Pará, Belém.

### **2. RÉSUMÉ**

La croissance du volume de trafic, du poids et des dimensions des véhicules a nécessité de nouvelles solutions dans les projets routiers, parmi lesquelles se distingue l'utilisation de l'asphalte caoutchouc. Malgré les avantages de l'asphalte caoutchouc, il est encore peu utilisé, surtout dans les pays en développement, c'est-à-dire que bien que les potentialités de l'asphalte caoutchouc soient largement reconnues, son application dans les pays en développement, comme le Bénin, reste en deçà des attentes. Par conséquent, l'objectif de ce travail est de vérifier la faisabilité de l'application de l'asphalte caoutchouc au Bénin. À cette fin, une recherche bibliographique a été effectuée abordant des aspects tels que : l'histoire, les processus de production, l'exploration de l'application mondiale de l'asphalte caoutchouc, la caractérisation spécifique du Bénin et des questions de viabilité économique, environnementale et technique de l'utilisation de l'asphalte caoutchouc. Selon les recherches effectuées, l'asphalte caoutchouc présente comme principales avantages : durabilité, résistance accrue et moindre nécessité d'entretien, et comme inconvénients majeurs : nécessite un contrôle technologique plus poussé, coûte plus cher et requiert une main-d'œuvre hautement qualifiée. En termes de coût, des études indiquent qu'il peut être de 15 à 20 % plus cher à mettre en œuvre, mais offre une économie de 60 % à long terme si l'on considère les coûts d'entretien. On a également constaté des rapports d'application de l'asphalte caoutchouc dans différents pays avec des conditions climatiques très diverses. Face à ce qui précède, on conclut comme viable l'application de l'asphalte caoutchouc sur les principales routes du Bénin, avec la réserve qu'une formation et une qualification des entreprises et de la main-d'œuvre exécutrices sont nécessaires.

**Mots-clés:** Asphalte-Caoutchouc; Durabilité; Chaussée.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de vantagens e desvantagens do asfalto borracha

Tabela 2 - Repartição de vias pavimentadas e não pavimentadas

Tabela 3 - Tabela comparativa revestimento convencional x revestimento asfalto-borracha.

Tabela 4 - Custo de manutenção + execução revestimento convencional x revestimento asfalto-borracha.

Tabela 5 - Quantidade de massa asfáltica produzida.

Tabela 6 - Custo do asfalto por tonelada

Tabela 7 - Tabela: Custos de usinagem/aplicação e custos totais.

Tabela 8 - Custos de execução e manutenção durante 7 anos

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Diferentes tamanhos de agregados.....	14
Figura 2 – Agregados cobertos de betume.....	15
Figura 3 – Processo úmido de fabricação do asfalto borracha.....	19
Figura 4 – Processo a seco de fabricação do asfalto de borracha.....	20
Figura 5 – Esquema de produção do asfalto borracha.....	23
Figura 6 – Obra de asfalto-borracha em Minas Gerais Brasil.....	24
Figura 7 – Percentagens do asfalto-borracha em alguns países.....	26
Figura 8 – Mapa de localização do Benim no continente africano.....	26
Figura 9 – Simulador de tráfego de campo.....	33
Figura 10 – Placas após simulador LCPC (laboratório).....	34

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>2. MÉTODO.....</b>	<b>9</b>
<b>3. REVISÃO LITERÁRIA.....</b>	<b>11</b>
3.1 Definição e Conceito do Asfalto Borracha.....	11
3.2 O Surgimento do asfalto borracha.....	12
3.3 Asfaltos Convencionais .....	13
3.3.1 Agregados.....	14
3.3.2 Ligante asfáltico (Betume) .....	15
3.3.3 Misturas quentes.....	15
3.3.4 Misturas mornas .....	16
3.3.5 Misturas Frias .....	16
3.4 Asfaltos borracha.....	17
3.4.1 Processo úmido.....	19
3.4.2 Processo Seco.....	20
3.4.3 Propriedades Do Asfalto de borracha.....	21
3.5 Aplicações no mundo do asfalto borracha.....	22
3.5.1 Esquema de produção do asfalto borracha.....	23
3.5.2 Aplicações no mundo.....	23
3.6 Caracterização e história de pavimentos em Benim.....	26
3.6.1 Caracterização geográfica e climática.....	26
3.6.2 A história de pavimentos em Benim.....	27
3.7 Viabilidades do asfalto borracha.....	27
3.7.1 Viabilidade economica.....	27
3.7.2 Viabilidade ambiental.....	32

3.7.3 Viabilidade técnica.....	33
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>35</b>
<b>5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>38</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A realização deste estudo sobre o asfalto borracha é motivada por diversos fatores relevantes tais como: (i) busca promover inovação na infraestrutura rodoviária, analisando as potenciais melhorias oferecidas pelo asfalto borracha em termos de durabilidade, resistência e desempenho estrutural, comparativamente ao asfalto convencional; (ii) aborda a gestão de resíduos sólidos, propondo explorar o aproveitamento de resíduos de pneus como uma estratégia eficaz para lidar com essa problemática, fomentando práticas de reciclagem e reutilização; (iii) Além disso, aborda a perspectiva de destaque da importância da sustentabilidade ambiental diante do crescente interesse global por soluções ecologicamente corretas.

Nesse contexto, o estudo investiga, em um plano mais amplo, o uso do asfalto de borracha, derivado de pneus reciclados, como uma alternativa sustentável para pavimentação. Simultaneamente, a análise se estende ao contexto econômico, considerando aspectos financeiros na avaliação da viabilidade do asfalto de borracha. A análise minuciosa dos custos e benefícios associados à sua implementação é crucial para embasar decisões informadas sobre investimentos em infraestrutura rodoviária. Em um plano mais restrito, busca-se obter indícios sobre a viabilidade técnico-econômica de aplicar o asfalto borracha em obras de pavimentação no Benim.

No Benim, o crescimento da frota de veículos na vida cotidiana tem um impacto direto na maior quantidade de pneus descartados segundo o Benin Data Portal (2023), houve um aumento de 127.011 veículos a mais de 2013 até 2023, representando um aumento de 29%. Em resposta a isso, surgiram diversas alternativas para reciclar a borracha dos pneus, incluindo sua aplicação no setor de pavimentação sendo uma alternativa sustentável e eficiente. Essa prática envolve a incorporação da borracha no ligante asfáltico como uma forma de modificação, aplicada na camada de revestimento em rodovias, avenidas, entre outros.

Nesse contexto, o asfalto borracha tem se mostrado uma opção promissora, devido à sua capacidade de utilização de pneus inservíveis e à sua durabilidade superior em relação ao asfalto convencional. Diante dessa tendência, surge a necessidade de analisar a viabilidade e o desempenho estrutural do asfalto borracha em diferentes contextos geográficos, como no Benim.

" [...] a sociedade necessita lidar com formas eficazes para solucionar o problema da eliminação de um volume cada vez maior de resíduos. Os Governos, juntamente com a indústria, as famílias e o público em geral devem envidar um esforço conjunto para reduzir a geração de resíduos e de produtos descartados" (CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS, 2001).

Essa revisão literária visa ampliar o entendimento da utilização de resíduos de borracha de pneus na pavimentação em engenharia civil, aprimorando o asfalto convencional de forma ecológica. Dados de testes de laboratório serão apresentados para demonstrar a viabilidade técnica, econômica e social da substituição do asfalto tradicional pelo de borracha, comparando parâmetros de desempenho conforme normas técnicas e científicas estabelecidas.

Esse estudo é relevante, para destacar oportunidades promissoras de reuso, reciclagem e inovação no setor de pavimentação, apesar dos danos causados pelos resíduos sólidos ao meio ambiente, à sociedade e à economia, ou seja, realizar uma investigação aprofundada sobre o uso do asfalto de borracha em Benim, abordando as dimensões bibliográficas, de viabilidade e de desempenho estrutural. Por meio do estudo bibliográfico aprofundado, busca-se consolidar conhecimentos existentes sobre o tema. A análise de viabilidade contemplará aspectos econômicos, técnicos, ambientais e científicos relacionados à implementação do asfalto de borracha, fornecendo subsídios para decisões. Ao final, o estudo se propõe a avaliar o desempenho estrutural desse material inovador em condições específicas de Benim.

## 1. MÉTODO

O presente trabalho adotou uma abordagem descritiva explicativa em seu desenvolvimento. Utilizando um método que combina a revisão sistemática da literatura com uma análise detalhada de diversos aspectos, diversas perspectivas e abordagens, o estudo integrou informações provenientes de fontes bibliográficas diversas para oferecer uma visão ampla do tema. A pesquisa buscou sintetizar conhecimentos sobre o surgimento do asfalto borracha, suas propriedades, processos de produção, comparação com o asfalto convencional, aplicações globais bem-sucedidas e considerações específicas (características geográficas e climáticas parecidas ou iguais) para a implementação em Benim. Ao adotar essa abordagem integrativa, o trabalho visa proporcionar uma compreensão aprofundada, técnica e científica do asfalto modificado, contribuindo para a base de conhecimento existente e fundamentando a análise de viabilidade e desempenho estrutural proposta.

Marconi e Lakatos (2017) afirmam que a revisão bibliográfica compreende todo o conteúdo derivado da literatura relacionada ao tema analisado. Esse conteúdo é definido como: publicações, artigos, livros, monografias, revistas e dissertações.

O levantamento bibliográfico teve como objetivo fundamentar o presente trabalho ao determinar os dados e informações necessários para alcançar o propósito da pesquisa com base nos mais renomados autores e fontes abordadas no estudo.

A fonte de dados para a pesquisa incluiu a base de dados do Benin Data Portal publicado em 2023, oferecendo informações específicas sobre o aumento da frota de veículos, tendo um impacto direto sobre o número de pneus descartados por ano e servindo de fonte de geração da matéria prima para o asfalto borracha. Utilizou-se a Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, a biblioteca digital da Unicamp e o Portal de Periódicos CAPES/MEC, biblioteca Digital da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), consideradas referências acadêmicas reconhecidas sendo utilizados como instrumentos para a coleta de dados, abordando os seguintes termos e assuntos: manutenção em pavimentos; patologia em pavimentos; pavimentos asfálticos; Asfalto Borracha de Balbo José Tadeu, Bernucci, Liedi Bariani, Jacques, Guilherme Ebani e também o Manual do DNIT. Também foram consultados trabalhos de literatura internacional para enriquecer a perspectiva global sobre o tema. Os critérios de inclusão abrangeram publicações relevantes que abordassem o asfalto de borracha, seus processos,

propriedades e aplicações, com foco especial em estudos relacionados aos atributos semelhantes ao Benim. Foram excluídas fontes que não atendiam aos critérios de relevância ou não apresentavam informações substanciais sobre o assunto. O período do levantamento bibliográfico abrangeu publicações de 2010 até 2023 com prioridade dos estudos mais recentes, garantindo uma ampla abordagem do tema.

A revisão e a abordagem do tema serão focadas em pontos cruciais sobre o asfalto de borracha em Benim, começando com sua origem e evolução. A análise incluirá uma comparação com o asfalto convencional, fazendo destaque de seus componentes e tipos de misturas. Será realizada uma análise detalhada dos processos de produção do asfalto de borracha, considerando métodos úmidos e secos, e serão exploradas as propriedades que influenciam seu desempenho. Casos de sucesso global serão examinados, seguidos pela contextualização da geografia e clima do Benim e a história de seus pavimentos.

Realizou-se uma análise detalhada de forma categorizada, relacionada aos estudos que apresentam aplicação prática para análise, estabelecendo, assim, uma conexão e compreensão com o tema a ser estudado e desenvolvido neste trabalho.

Por fim, apresenta-se uma análise das viabilidades econômica, ambiental e técnica do asfalto de borracha em Benim, considerando desafios e oportunidades. Essa abordagem multifacetada permitirá uma análise servindo de base para o estudo de viabilidade e desempenho estrutural proposto.

### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1 Definição e conceito do asfalto borracha**

Para Thives (2016), o asfalto borracha um tipo de pavimento modificado que incorpora borracha proveniente de pneus reciclado sendo um dos componentes do ligante asfáltico. Essa modificação busca aperfeiçoar diversas propriedades do pavimento, como resistência, durabilidade e elasticidade. O processo de fabricação envolve a mistura do asfalto convencional com grânulos de borracha, resultando em um material capaz de suportar melhor as condições de tráfego e as variações climáticas. Essa busca inovadora visa não apenas melhorar o desempenho estrutural das estradas, mas também promover a reutilização sustentável de resíduos de pneus.

Segundo Ramalho ( 2019, p.18):

Algumas formas de se definir o “asfalto-borracha” são encontradas na literatura, uma destas é mencionada pela empresa brasileira responsável pelo refinamento de petróleo no Brasil, a Petrobrás, que no ano de 2009, citou que o asfalto borracha trata-se de um asfalto modificado por intermédio da inclusão em sua composição da borracha triturada retirada de pneus. Esta mesma fonte literária, ainda comentou sobre este processo, que ao destinar de maneira nobre os pneus inservíveis, é capaz de solucionar um grande problema ecológico; e inclusive através da utilização do asfalto borracha nas pavimentações, melhora-se as propriedades e a performance do revestimento.

#### **3.2 O surgimento do Asfalto borracha**

A demanda por ligantes na construção de estradas surgiu simultaneamente à edificação das primeiras vias. Segundo Zenke, o Rei George IV, da Inglaterra, outorgou uma patente autorizando o uso de borracha natural na construção de estradas ao Sr. Honcock em 1823.

A primeira patente que combinou material betuminoso com borracha natural para a construção de estradas foi concedida a E. E. Cassell em 1844 na Inglaterra. No entanto, as aplicações práticas de asfaltos modificados só tiveram início em 1901, quando a "Societe du Pavage un Asphalt Caoutchoute" foi estabelecida na França.

As primeiras tentativas de usar sucata de borracha de pneu no asfalto datam da

década de 1950, mas o desempenho do material resultante não incentivou os pesquisadores a seguir em frente. Não foi até 1960 quando o engenheiro de materiais Charles H. McDonald (funcionário dos EUA) O Bureau of Public Roads, agora FHWA dirigiu um trailer por todo o país para inspecionar as estradas, usando uma mistura de pó de pneu e asfalto para selar as rachaduras Carlson e Zhu, (1999, p. 32).

O asfalto de borracha, também conhecido como asfalto ecológico, teve seu desenvolvimento nos Estados Unidos durante a década de 1960. Charles H. McDonald iniciou as pesquisas ao perceber que pneus triturados poderiam fornecer um material elástico útil para corrigir problemas relacionados à durabilidade, resistência e flexibilidade do asfalto. No entanto, essa tecnologia só foi amplamente adotada no final do século XX, quando seu custo de produção tornou-se economicamente viável.

Alinhado à crescente proposta global de sustentabilidade por meio da reutilização e reaproveitamento de materiais descartados, diversas pesquisas e experimentos revelaram as qualidades dos agregados de borracha em ligantes asfálticos. Esta tecnologia é bem reconhecida e aplicada em vários estados norte-americanos, como Califórnia, Flórida e Arizona.

Em 1991, o ISTEA (Intermodal Surface Transportation Efficiency Act - EUA) determinou que as pavimentações asfálticas nos Estados Unidos deveriam incorporar borracha de pneus. De acordo com Tchobanoglous et al. (1993), o asfalto com borracha tem sido utilizado nos EUA desde a década de 60, e em 1993, aproximadamente dois milhões de pneus foram utilizados nessa prática.

Segundo o Rubber Pavement Association-RPA (2001), a aplicação de misturas com asfalto emborrachado tem demonstrado desempenho significativamente superior às misturas convencionais. Assim, o estado da Califórnia permitiu a redução em 50% da espessura das camadas betuminosas quando a borracha é incorporada à composição.

Conforme a Agência Ambiental Inglesa (EA-UK, 2008), em 1997, o mundo consumiu 16,7 milhões de toneladas de borracha, sendo mais de 60% desse total correspondente à borracha sintética. Mundialmente, mais de um bilhão de pneus são fabricados a cada ano por mais de 130 empresas, embora um pequeno grupo de multinacionais domine o mercado.

De acordo com a Agência Ambiental Inglesa (EA-UK, 2008), a partir da década de 70, os pneus diagonais foram substituídos pelos radiais, que oferecem maior resistência, flexibilidade e durabilidade. No entanto, a durabilidade dos pneus está diretamente relacionada ao seu uso, manutenção, quilometragem percorrida e condições das estradas.

Segundo dados da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) publicado por Echimenco (2001) , cerca de 100 milhões de pneus inservíveis estão abandonados, armazenados ou relegados a áreas abertas no Brasil. Anualmente, estima-se que aproximadamente 30 milhões de unidades se somem a esses resíduos. Conforme a EPA (1991), a reutilização de borracha no asfalto consumiu aproximadamente um milhão de pneus por ano até 1990.

Na África, particularmente em Benim, embora haja menos estudos específicos sobre o uso de asfalto de borracha na África, as características do material e seus benefícios (como durabilidade, resistência e reciclagem de pneus) poderiam ser muito vantajosos para o país na contribuição de resolução de problemas de infraestruturas rodoviárias e gestão de resíduos de pneus.

A mistura asfáltica é composta pelos três principais elementos: agregados, materiais de enchimento e um aglutinante (betume). Vazios de ar também estão presentes na mistura, dependendo do grau de compactação. Outros aditivos, como cimento, também podem estar presentes como ingredientes. A mistura influencia a qualidade e a vida útil do pavimento (O'Flaherty, 2002).

### **3.3 ASFALTOS CONVENCIONAIS**

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).

### 3.3.1 Agregados

A qualidade do concreto asfáltico é fundamental, dependendo de requisitos como granulometria adequada, dureza, resistência à abrasão, limpeza, porosidade, estabilidade térmica, coeficiente de atrito, controle de reatividade álcali-agregado, resistência à compressão e formato das partículas. A seleção cuidadosa dos agregados é crucial para garantir desempenho e durabilidade em diversas condições, ou seja, os principais requisitos para os agregados são a curva de distribuição do tamanho das partículas, o índice de lamelação e o valor do moinho de bolas (Parhamifar, 2014).

Os agregados são a parte mais importante dentro de uma superfície de concreto asfáltico para fornecer a resistência essencial à carga e ao desgaste. Essa é a razão pela qual os agregados estão presentes em grande quantidade no pavimento de concreto asfáltico. Na Figura 1 é possível identificar diferentes tamanhos de grãos dos agregados.

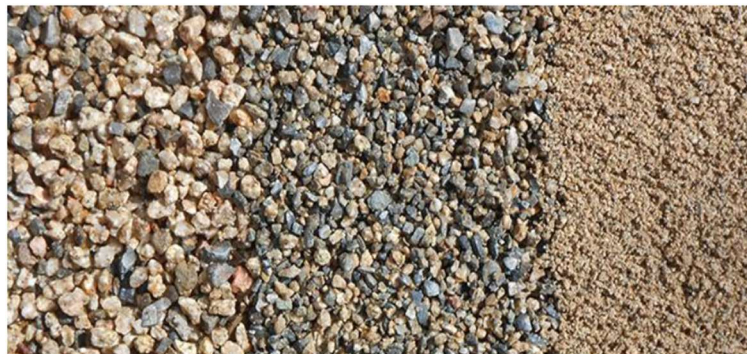


Figura 1: Diferentes tamanhos de agregados, Fonte (Werner Corporation, n.d.)

### 3.3.2 Ligante asfáltico (betume)

O ingrediente-chave da mistura asfáltica é o betume (material aglutinante). É um subproduto da produção de petróleo e é necessário para manter os agregados ligados entre si, como mostrado na Figura 2. Funções adicionais do betume incluem impedir que os agregados se esmagassem, conferindo-lhes resistência para moldar-se sem falhar, além de proporcionar à mistura asfáltica sua capacidade de suporte (Parhamifar, 2014).



Figura 2 : Agregados cobertos de betume; Fonte: Petro Asian FZC, s.d.

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

### **3.3.3 Misturas Quentes**

O Asfalto Usinado a Quente (AAUQ), com sua faixa de temperatura de produção variando entre 150°C a 180°C, constitui-se de uma combinação de agregados minerais, representando aproximadamente 95%, e o cimento asfáltico de petróleo (CAP), em torno de 5%. Os agregados primários incluem britas e pó-de-pedra, desempenhando um papel crucial na resistência mecânica e estabilidade da mistura no pavimento. Quanto ao CAP convencional, categorizado conforme sua consistência medida por penetração de agulha a 25°C (CAP 30/45, CAP 50/70, entre outros) em décimos de milímetro, sua função principal reside em conferir coesão, flexibilidade, impermeabilidade e durabilidade à mistura asfáltica (BRITA PINHAL, 2017).

### **3.3.4 Misturas Mornas**

As misturas mornas fazem referência a tecnologias concebidas para diminuir as temperaturas durante o processo de fabricação e compactação das misturas asfálticas no local. Essas temperaturas têm a capacidade de ser reduzidas em cerca de 30°C a 50°C, proporcionando vantagens tanto para o meio ambiente quanto para os trabalhadores. Além

disso, contribuem para prolongar a vida útil do revestimento asfáltico e simplificam a logística de engenharia necessária na construção das vias (SINICESP, 2016).

### **3.3.5 Misturas frias**

No processo de pré-misturado a frio (PMF), a emulsão asfáltica, que representa uma dispersão do CAP em fase aquosa estabilizada com tensoativos, conecta os agregados grossos e finos sem a necessidade de aquecimento, ocorrendo à temperatura ambiente. Nas misturas frias, é possível empregar agregados úmidos, diferentemente das misturas a quente, que demandam a secagem dos materiais pétreos para garantir a aderência do ligante aos agregados. Em função da origem mineral dos agregados, pode ser essencial adicionar cal para promover a adesividade com o CAP (BRITA PINHAL, 2017).

Conforme indicado por Brita Pinhal (2017), o PMF é aproximadamente 50% mais econômico em comparação com o CBUQ, variando conforme a região do Brasil. Portanto, a escolha entre um ou outro método depende das características específicas da obra. Embora uma mistura asfáltica a quente ofereça maior qualidade e resistência em comparação com uma mistura a frio, o PMF, com um traço bem definido e projetado, pode ser uma alternativa mais viável para vias com baixo volume de tráfego. As misturas frias demandam um volume maior de vazios para permitir a evaporação da água, tornando-as mais susceptíveis à ação da água e do ar, o que resulta em maior desgaste e envelhecimento acelerado em comparação com o CBUQ.

Dentre essas abordagens, a mistura quente é a mais prevalente devido à sua elevada resistência mecânica, embora, por outro lado, ela acarreta sérios impactos ambientais como por exemplo a emissões prejudiciais durante a incineração, comprometendo qualidade do ar e contaminando solo e água ou seja gera uma variedade de poluentes atmosféricos prejudiciais, resultar na liberação de poluentes atmosféricos, como por exemplo o dióxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.

### **3.4 Asfalto Borracha**

A aplicação de borracha proveniente de pneus sem utilidade agrega vantagens e atenua questões ambientais quando empregada na formulação de asfalto-borracha. O descarte inadequado de pneus representa uma preocupação social, e, nesse sentido, a sua utilização na pavimentação tem se destacado como uma das abordagens mais difundidas globalmente. Essa

prática é amplamente adotada, proporcionando aprimoramentos significativos nas misturas asfálticas em diversos aspectos (BERNUCCI et al., 2008).

Conforme Mozart e Rihs (2018) afirmam, a introdução de pneus inservíveis no asfalto efetivamente atende ao propósito de aprimorar as características do pavimento, promovendo maior durabilidade e desempenho, ao mesmo tempo em que contribui para a preservação ambiental. As propriedades intrínsecas da borracha conferem melhorias ao ligante asfáltico, resultando em maior flexibilidade e tornando a mistura mais resistente ao envelhecimento, deformações e trincas. Além disso, destaca-se o incremento na segurança dos usuários nas vias, em comparação ao uso do asfalto convencional. Essa prática não apenas oferece benefícios ecológicos, mas também vantagens ambientais e sociais, ao destinar adequadamente os pneus sem uso.

É importante notar que o processo de mistura do asfalto-borracha com os agregados minerais e a aplicação do concreto asfáltico seguem procedimentos semelhantes aos utilizados em misturas com ligantes convencionais, com exceção das temperaturas. No caso do asfalto-borracha, as temperaturas de mistura e compactação são mais elevadas devido à maior viscosidade desse tipo de asfalto (ROSENO, 2005). Entretanto, é crucial considerar que a elevada temperatura necessária para a aplicação de asfaltos representa um risco para a saúde dos trabalhadores, além de causar maior poluição ambiental, liberando gases indesejáveis no meio ambiente.

Devido à alteração na estrutura química do asfalto-borracha e às propriedades intrínsecas da borracha, o asfalto sustentável oferece várias vantagens em relação ao cimento asfáltico convencional (CAP). Segundo Fontes (2009), as principais vantagens do uso do asfalto-borracha é a maior resistência e a sua durabilidade. Apesar das inúmeras vantagens vistas pelo uso da borracha, Takatu (2004), apud Guimarães (2012) aponta algumas desvantagens que podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens do asfalto borracha

<b>VANTAGENS E DESVANTAGENS</b>	
<b>VANTAGENS</b>	<b>DESVANTAGENS</b>
Oferece maior durabilidade: o pavimento de asfalto-borracha é cerca de 40% mais resistente do que o asfalto convencional. Enquanto o de borracha dura em média 14 anos, o comum dura apenas 10 anos.	Heterogeneidade, como cada pneu tem uma composição diferente e um tamanho de partícula muito insuficiente, existem diferenças tanto na física quanto na química.
Tem maior aderência: isso ajuda a evitar derrapagens e reduz o spray causado pelos pneus em dias de chuvas.	Em comparação com o equipamento de asfalto tradicional, o duto no equipamento tem uma capacidade maior.
Garante estradas mais seguras: o asfalto borracha do processo in situ proporciona uma massa com alto coeficiente de atrito, o que torna as estradas seguras e silenciosas.	Uma caldeira com maior capacidade de aquecimento, pois o asfalto borracha requer uma temperatura de 175 °C, enquanto a caldeira de uma fábrica tradicional chega apenas a 160 °C
Evita a contaminação do solo e as reservas de água: se não for reciclada ou disposta corretamente no lixo, a borracha presente no solo pode causar sérias contaminações, levando até 400 anos para desaparecer.	Nas operações, usinagem, estocagem e mão de obras específicas para manuseio do material
É vantajoso para as concessionárias: além da resistência, o uso do asfalto-borracha reduz o consumo de massa asfáltica na obra e diminui o custo de manutenção.	Geradores de gases no seu processo de usinagem, maior odor nas aplicações dos pavimentos

Fonte: Autor

A implementação bem-sucedida do asfalto borracha apresenta desafios significativos, principalmente relacionados à trabalhabilidade do material. Dada a complexidade de sua composição, a execução requer uma mão de obra altamente qualificada e treinada. A mistura asfáltica modificada com borracha exige precisão no manuseio de equipamentos especializados, além de conhecimento técnico para garantir a correta dosagem e aplicação. Essa complexidade ressalta a importância de investir na capacitação adequada da mão de obra envolvida na pavimentação com asfalto borracha. No contexto da implementação em Benim, é fundamental considerar estratégias de treinamento e qualificação profissional para garantir a eficiência e durabilidade desse material inovador nas rodovias do país.

A borracha proveniente de pneus triturados pode ser empregada tanto como modificador do asfalto quanto como agregado em misturas asfálticas. Para Oliveira Neto (2016) e Kamikura (2002), a incorporação dessa borracha nas misturas asfálticas pode ser realizada por meio de dois métodos principais: o processo úmido (wet process) e o processo seco (dry process).

### 3.4.1 Processo Úmido

O asfalto borracha obtido por meio do processo úmido consiste na junção do ligante asfáltico convencional, borracha granulada reciclada e, se necessário, outros aditivos. A borracha granulada proveniente de pneus é incorporada ao ligante asfáltico convencional, sendo aquecida para amolecer as partículas de borracha antes da aplicação como ilustrado pela Figura 3.

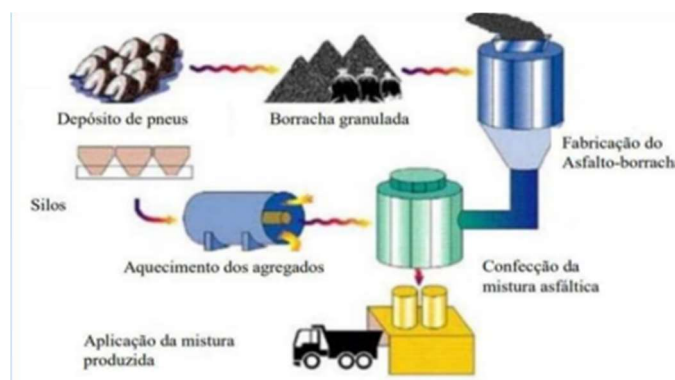


Figura 3: Processo úmido de fabricação do asfalto borracha. Fonte: Dantas Neto et al (2003).

No processo úmido, o pó de borracha é adicionado ao ligante betuminoso antes da mistura. A mistura é então compactada e incorporada a várias superfícies asfálticas; aproximadamente 2.000 pneus fora de uso são necessários para cada milha de via única, ou seja, 1,5 quilômetro de via coberta com uma camada de revestimento de borracha com duas polegadas de espessura ( Canadian Association of Tire Recycling Agencies, CATRA 2000). Os aditivos geralmente incluem óleos extensores, cujo objetivo é aprimorar a maleabilidade dos pavimentos modificados ou melhorar a compatibilidade entre o ligante e a borracha (PILATI, 2008).

No método úmido, o ligante asfáltico é aquecido a aproximadamente 190°C em um tanque de superaquecimento sob condições herméticas, sendo então transferido para um reservatório de mistura apropriado. Nesse reservatório, a borracha moída é adicionada ao ligante convencional, passando por uma mistura que dura de 1 a 4 horas, mantendo uma temperatura específica (PILATI, 2008). O equipamento misturador deve ser equipado com um sistema para controlar a temperatura e o tempo de reação de maneira constante e uniforme, além de um mecanismo de agitação que previne a segregação das partículas de borracha. A

quantidade de borracha incorporada ao ligante por meio do processo úmido geralmente varia de 5 a 25% em peso, com partículas normalmente inferiores a 2 mm (FAXINA, 2002).

O resultado é um asfalto modificado que tem propriedades significativamente diferentes do asfalto original. A mistura do asfalto com a borracha reage e forma um composto chamado asfalto-borracha (ODA, 2000, p.2).

Frequentemente, a preparação do ligante modificado com borracha é realizada no estilo "just in time", ou seja, é preparada no próprio canteiro de obras e utilizada imediatamente. No Brasil, o método úmido está sendo empregado por meio do terminal blending, onde a mistura é efetuada em um local adequado fora do canteiro de obras e transportada até o ponto de aplicação (SPECHT, 2004). A interação entre a borracha moída e o ligante asfáltico no processo úmido é categorizada como uma reação. Diversos fatores influenciam o 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).

### 3.4.2 Processo seco

No método seco, a borracha triturada é incorporada à mistura como parte dos agregados, formando conjuntamente o "agregado-borracha", que é combinado com o ligante como destacado a Figura 4.

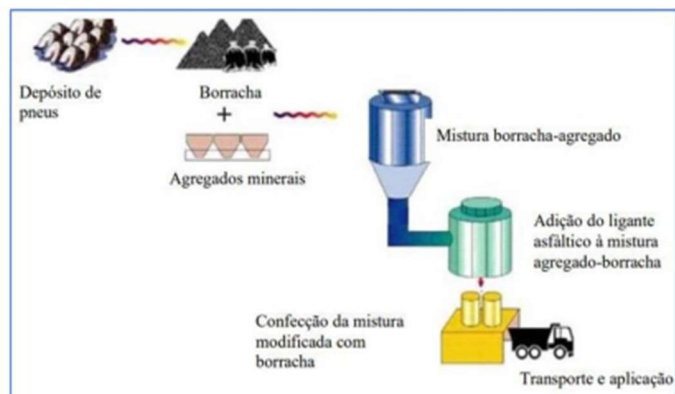


Figura 4: Processo a seco de fabricação do asfalto borracha. Fonte: Dantas Neto et al (2003).

Essa mistura seca deve ser exclusivamente utilizada em processos de mistura a quente (BERNUCCI et al., 2008). Nesse procedimento, os agregados são aquecidos a temperaturas em torno de 200°C. Em seguida, a borracha é introduzida e a mistura é processada por aproximadamente 15 segundos, ou até que se forme uma combinação homogênea de agregado-borracha. Posteriormente, o ligante betuminoso é adicionado a essa mistura por meio de técnicas convencionais de usinagem (SILVA, MARQUES, 2018). De 3 a 5% de borracha em relação à massa total de agregados minerais é incorporado nesse processo, com partículas variando de 1,6 a 6,4 mm. A quantidade de borracha consumida nesse método chega a ser 2 a 4 vezes maior do que no processo úmido (FAXINA, 2002).

No método seco, as dimensões das partículas de borracha são maiores do que as utilizadas no método úmido. Da mesma forma, a borracha granulada substitui uma parte da mistura dos agregados minerais, atuando como um material inerte. Conforme apontado por Faxina (2002), o processo seco é limitado à aplicação em revestimento asfáltico, enquanto o processo úmido pode ser empregado em tratamentos superficiais, camadas de ligação, selagem de trincas e concreto asfáltico.

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

### **3.4.3 Propriedades do asfalto de borracha**

O asfalto de borracha é uma variante do asfalto convencional que incorpora grânulos de borracha reciclada de pneus descartados. Essa adição de borracha traz uma série de propriedades e benefícios únicos como, por exemplo:

**Resistência e durabilidade:** a presença da borracha confere maior durabilidade ao asfalto, tornando-o mais resiliente a fissuras, deformações e fadiga causadas pelo tráfego e variações climáticas;

**Flexibilidade e elasticidade:** a borracha adicionada aumenta a capacidade de deformação e recuperação do asfalto, ajudando a reduzir trincas e deformações permanentes;

**Redução de ruído:** o asfalto de borracha tem a capacidade de reduzir o ruído gerado pelo tráfego, o que é uma vantagem significativa em áreas urbanas;

**Melhor aderência:** o asfalto de borracha muitas vezes tem melhor aderência ao pavimento, proporcionando maior segurança para os veículos, especialmente em condições adversas, como chuva;

**Resistência a altas temperaturas:** a adição de borracha pode aumentar a resistência do

asfalto a altas temperaturas, prevenindo o amolecimento excessivo em climas quentes;

Contribuição para a economia circular: A utilização de materiais reciclados promove a economia circular, ajudando a minimizar o desperdício e a maximizar o valor dos recursos.

Essas propriedades fazem do asfalto de borracha uma opção atrativa para melhorar a qualidade e a durabilidade dos pavimentos, ao mesmo tempo em que oferece benefícios ambientais e econômicos.

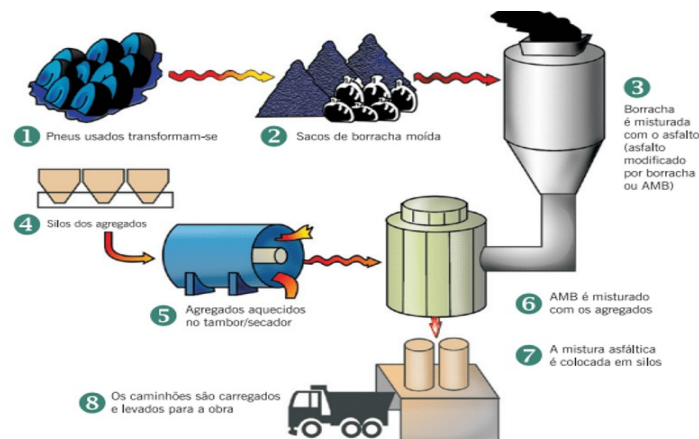
### 3.5 APLICAÇÕES NO MUNDO DO ASFALTO-BORRACHA

#### 3.5.1 Esquema de produção do asfalto borracha

Para viabilizar a incorporação da borracha de pneus no asfalto, é essencial que ela passe por um processo de trituração e seja separada do aço presente em sua composição. Após a trituração, a borracha passa por uma etapa de granulação, transformando-se em partículas com diâmetro aproximado de 1,5 mm a 3 mm.

Esse processo é subdividido em sete etapas. A Figura 5 apresenta de forma visual as etapas do processo. Na etapa 1, pneus inservíveis são descartados; na etapa 2, a borracha dos pneus é moída até atingir uma granulometria de aproximadamente 1,5 mm a 3 mm; na etapa 3, o pó de borracha é incorporado ao ligante asfáltico CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo); na etapa 4, os silos de agregados são aquecidos; na etapa 5, os agregados são aquecidos em um tambor a cerca de 180°C; na etapa 6, a mistura do ligante asfáltico com a borracha em pó e os agregados previamente aquecidos é colocada em um tanque de mistura; na etapa 7, o asfalto-borracha é armazenado; na etapa 8, ocorre o transporte para a obra onde será utilizado.

Figura 5: Esquema de produção do asfalto-borracha com o ligante.



Fonte: Marques (BERNUCCI et al., 2008)

### 3.5.2 Aplicações no Mundo

A origem do uso do asfalto de borracha remonta aos anos 1960 em Phoenix, Arizona, onde foi inicialmente empregado como material de pavimentação. Desde então, sua adoção não parou de crescer nos Estados Unidos, com uma prevalência particular na Califórnia, Arizona, Flórida e Texas. O relatório de 2018 do Departamento de Transportes da Califórnia afirma que quase metade dos pavimentos construídos naquele ano incorporou asfalto de borracha. Isso resultou no uso de uma quantidade total que ultrapassou as 35.000 toneladas de pó de borracha, ou seja, a tecnologia que reutiliza borracha proveniente de pneus inservíveis é notável.

No Estado do Arizona, em torno de 90% dos serviços de pavimentação são feitos com asfalto-borracha. Na Califórnia, o asfalto-borracha é aplicado em capas selantes, em membranas absorvedoras de tensão e como selante de trincas e juntas (SHATNAWI & LONG, 2000. P. 20).

Somente no estado do Arizona, mais de 3.300 quilômetros de rodovias foram construídos ou restaurados utilizando ligantes modificados com borracha (LIMA, C.S. et al, 2005, p. 49).

Na Flórida, desde a implantação, em 1994, até 1999, mais de 2,7 milhões de toneladas de misturas asfálticas modificadas com borracha foram empregadas na execução de pavimentos (CHOUBANE et al., 1999, p. 20).

A introdução do asfalto de borracha no Canadá remonta ao início dos anos 2000, com testes principalmente realizados em Alberta, Colúmbia Britânica, Ontário e Saskatchewan. Em comparação com os Estados Unidos, os resultados dos trechos de teste no Canadá não foram tão conclusivos no passado. Além disso, erros ocorridos durante os testes impediram avanços na adoção do asfalto de borracha além da fase experimental no Canadá. No entanto, em condições ideais de construção, incluindo precisão na mistura e treinamento adequado de empreiteiros e municípios, espera-se que o asfalto de borracha apresente desempenho semelhante ao observado nos Estados Unidos.

No Brasil, o estado do Rio Grande do Sul foi precursor na alteração das fórmulas tradicionais de asfalto e, em agosto de 2001, executou o primeiro segmento viário com cerca de dois quilômetros de extensão, incorporando borracha à composição do asfalto. A Figura 6 apresenta a inauguração da primeira obra com a aplicação de asfalto-borracha em Minas Gerais.



Figura 6: Primeira obra de asfalto-borracha em Minas Gerais/Brasil

Fonte: [http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1808-23942007000300008&lng=es&nrm=is](http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1808-23942007000300008&lng=es&nrm=is)

Neste momento, o asfalto borracha, fabricado pela empresa Greca Distribuidora de Asfaltos Ltda, já está em uso em várias rodovias situadas em diversos estados. Por exemplo, o DER/PR possui em sua malha aproximadamente 400 km de obras com asfalto Borracha tanto de implantação como de restauração de rodovias estaduais. Os DERs estaduais do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo também já realizaram obras com asfalto Borracha. A obra de pavimentação mais extensa no Brasil utilizando esse tipo de tecnologia é o Sistema Anchieta - Imigrantes, no estado de São Paulo, sob gestão da concessionária Ecovias.

Nela, o asfalto-borracha é aplicado com uma faixa de agregados diferenciados (técnica baseada em normas vigentes no estado da Califórnia), que tornam o pavimento mais rugoso. A rugosidade melhora a estabilidade da pista em situações de velocidade e também impede a hidroplanagem causada por excesso de água na pista. (MORILHA E GRECA, 2003).

Até o momento, a implementação do asfalto-borracha na África tem sido notavelmente limitada, com registros indicando sua aplicação principalmente na África do Sul. Embora essa inovação tenha experimentado um crescimento significativo em outras partes do mundo, ainda não se tornou amplamente conhecida ou adotada em grande escala no continente africano. No contexto específico do Benim, não há evidências substanciais de implementação ou familiaridade com essa tecnologia inovadora. A realização de uma

pesquisa bibliográfica detalhada sobre o uso do asfalto-borracha visa preencher essa lacuna de conhecimento, explorando seus benefícios estruturais, econômicos e ambientais. Com base nessa pesquisa, espera-se que as conclusões possam servir como uma valiosa recomendação para a consideração e eventual implementação do asfalto-borracha, destacando seus impactos positivos na durabilidade, resistência e sustentabilidade das estruturas viárias levando em consideração a mão de obra executiva.

Nestes eventos percebe-se o quanto o Asfalto Borracha é pesquisado e aplicado em todo o mundo. Considera-se também que países como EUA e África do Sul possuem total domínio sobre esta tecnologia que já a utilizam há mais de 20 anos. Os engenheiros da GRECA ASFALTOS estiveram tanto nos EUA como na África do Sul para estudar o Asfalto Borracha e possibilitar a adaptação da tecnologia.( GRECA ASFALTOS), Pg 10-11.

A implementação do asfalto borracha tem ganhado destaque em alguns países africanos, notadamente em Angola e Argélia junto com o Brasil e outros países conforme representado na Figura 7. Esses países têm demonstrado interesse crescente na incorporação dessa tecnologia inovadora nas práticas de pavimentação. A utilização do asfalto borracha nessas nações não apenas proporciona benefícios técnicos, como maior durabilidade e resistência, mas também contribui para iniciativas sustentáveis.

Figura 7: Percentagens do asfalto-borracha em alguns países



Fonte: Asfalto de qualidade, 2015.

### 3.6 CARACTERIZAÇÃO E HISTÓRIA DE PAVIMENTOS EM BENIM

#### 3.6.1 Caracterização geográfica e climática

O Benim é um país localizado na África Ocidental, com uma rica história e cultura. Ele faz fronteira com Nigéria, Níger, Burkina Faso e Togo. A capital do Benim é Porto-Novo, embora a cidade mais populosa seja Cotonou e que é conhecida como a capital econômica. Na Figura 8, destacam-se claramente os países fronteiras conforme citado. . .

Figura 8: Mapa de localização do Benim no continente africano



Fonte: Autor

O Benim possui dois tipos de climas. No sul, um clima equatorial com alta umidade. Há uma alternância entre as estações secas (de novembro a março e de meados de julho a meados de setembro) e as estações chuvosas (de abril a meados de julho e de meados de setembro a outubro).

No centro e no norte, um clima tropical. Uma estação seca de novembro a abril e uma estação chuvosa de junho a setembro. Na Capital, as temperaturas têm uma amplitude reduzida: as máximas variam de 28 a 32°C e as mínimas de 23 a 26°C. A precipitação anual nesta cidade é de 1245 mm.

### 3.6.2 A história de pavimentos em Benim

As primeiras rodovias asfaltadas foram construídas nos anos seguintes à independência e foram construídas na cidade de Cotonou, a maior cidade e o principal porto do Benim como parte dos esforços de modernização e desenvolvimento do país em 1960. A abundância de pneus usados no mercado deve-se ao fato de que o setor de pneus usados para exportação está muito concentrado na África. Cerca de 60% das exportações mundiais de pneus usados são destinadas à África, principalmente para o Benin, Costa do Marfim, Camarões, Mali e Burkina Faso, sendo que o Benin sozinho importa 4.312 toneladas por ano (ADEME, 2013) onde 2874,6 tonelada ou seja 2/3 são descartados anualmente ou seja uma quantidade suficiente servindo de matéria prima para a implementação. A melhoria da infraestrutura rodoviária no país hoje continua sendo uma prioridade devido ao seu papel econômico e de desenvolvimento de qualquer país.

No Benim, aproximadamente, mais o menos 10% das estradas são pavimentadas como mostra a Tabela 2 segundo os dados da Benin Data Portal a seguir:

Tabela 2: Repartição de vias pavimentadas e não pavimentadas

Repartition du reseau routiers national bitumés												Total
Units	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	10 ans
km	2211,77	2211,77	2303,48	2303,5	2329,12	2684,82	2731	2972,28	3130,42	3285,93	3285,93	29450
Repartition du reseau routiers national non bitumés( en terre)												Total
Units	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	10 ans
km	29530	25360	23870	22380	21990	20188	19600	18360	22350	24985	22987	251600
Percentagem de pavimentação												12%

Fonte: Benin Data Portal

Vale ressaltar que estas estradas são dimensionadas com base em procedimentos técnicos consagrados com o método do CBR ou normas da AASHTO seguindo o ministério das infraestruturas e de transportes de Benim (MIT/Benin).

## 3.7 VIABILIDADES DO ASFALTO BORRACHA

### 3.7.1 Viabilidade econômica

Um dos principais focos de pesquisa no início do desenvolvimento do asfalto modificado com borracha como uma alternativa para aprimorar algumas características do

asfalto convencional foi a análise da viabilidade econômica. Este estudo envolveu a comparação dos custos associados à produção de ambos os tipos de asfalto, visando não apenas considerações técnicas, mas também tornar a modificação do asfalto com borracha mais vantajosa do ponto de vista financeiro.

O aspecto econômico não se limita apenas ao custo inicial que o asfalto-borracha incorrerá em comparação com o asfalto convencional; todo o processo de produção, aplicação e manutenção deve ser considerado ao realizar essa comparação.

Análises subsequentes destacam estudos conduzidos em vias brasileiras, evidenciando o investimento inicial na modificação do asfalto com borracha, alguns custos dos processos de fabricação e o custo final. Isso possibilita a comparação com os custos de manutenção das vias após alguns anos de utilização. A Tabela 2 oferece uma comparação dos custos em relação à quantidade de revestimento asfáltico convencional e do revestimento asfáltico modificado com borracha, resultando em um custo total da obra para ambos os revestimentos. Na Tabela 4, são apresentados os custos de manutenção e execução das massas asfálticas. Importante ressaltar que os valores obtidos em real (moeda brasileira) foram convertidos em Fcfa (Franco cfa) sendo a moeda local de Benim. A conversão da unidade 1 para a unidade 2 foi feita levando em consideração uma equivalência do Real (R\$) para o Franco CFA ou seja 1 real sendo igual a 120 F Cfa para o cálculo baseado na financial services company (Western Union).

Tabela 3 - Tabela comparativa revestimento convencional x revestimento asfalto-borracha.

GRANDEZAS	CÁLCULO	UNIDADE 1	TIPO DE ASFALTO		UNIDADE 2	TIPO DE ASFALTO		
			CAP 50/70	ASFALTO BORRACHA (ECOFLEX)		CAP 50/70	ASFALTO BORRACHA (ECOFLEX)	
A	Quantidade de massa asfáltica CBUQ produzida		26.250	18.375	ton	3.150.000	2.205.000	
B	Custo de Usinagem / Aplicação por tonelada de CBUQ aplicado	R\$ / ton	200	230	Fcfa/ton	24.000	27.600	
C	Quantidade de massa x Custo de Usinagem / Aplicação	A x B	R\$	5.250.000,00	4.226.250,00	Fcfa	630.000.000	507.150.000
D	Teor de Asfalto	% peso	5%	5,50%	% peso	5%	5,50%	
E	tonelada	R\$ / ton	1.150,00	1.550,00	Fcfa/Ton	138.000,00	186.000,00	
F	Custo de asfalto no CBUQ	A x D x E	R\$	1.509.375,00	1.566.468,75	Fcfa	181.125.000,00	187.976.250,00
G	Custo total de obra	C + F	R\$	6.759.375,00	5.792.718,75	Fcfa	811.125.000,00	695.126.250,00

Fonte: Greca Asfaltos (2009) e Autor

Tabela 4 - Custo de manutenção + execução revestimento convencional x revestimento asfalto-borracha.

GRANDEZAS	CÁLCULO	UNIDADE1	TIPO DE ASFALTO		UNIDADE 2	TIPO DE ASFALTO		
			CAP 50/70	ASFALTO BORRACHA(E COFLEX)		CAP 50/70	ASFALTO BORRACHA(E COFLEX)	
A	Execução do pavimento com preparo de base em extensão	m	200	200	m	24000	24000	
B	Custo de execução do pavimento com preparo de base	R\$ / m <sup>2</sup>	46,66	77,22	Fcfa / m <sup>2</sup>	5599,2	9266,4	
C	Manutenção do pavimento no período de 7 anos	% m <sup>2</sup>	70%	10%	% m <sup>2</sup>	70%	10%	
D	Custo geral da manutenção do pavimento	R\$ / m <sup>2</sup>	67,3	67,3	Fcfa / m <sup>2</sup>	8076	8076	
E	Percentual de custo x manutenção do pavimento	C x D	R\$ / m <sup>3</sup>	47,11	6,73	Fcfa / m <sup>3</sup>	5653,2	807,6
F	Custo de execução + manutenção do pavimento	B + E	R\$ / m <sup>2</sup>	93,77	83,95	Fcfa / m <sup>2</sup>	11252,4	10074

Fonte: Zatarini et al., (2017) e Autor]

Da mesma forma, realizou-se uma análise de custos para um projeto de restauração abrangendo 30 km, onde as especificações indicam a aplicação de uma camada de concreto asfáltico com ligante CAP-50/70, com espessura de 5 cm. As Tabelas 5 e 6 apresentam o orçamento para um revestimento de Asfalto Borracha, com uma redução de espessura de 30%, ou seja, reforçado com 3,5 cm, conforme dados fornecidos pela Greca Asfaltos (2009)

Tabela 5: 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 <sup>3</sup> = 26.250 toneladas de massa asfáltica de CBUQ normal	30.000m x 7,00m x 0,035m x 2,5 t/m <sup>3</sup> = 18.375 toneladas de massa asfáltica de CBUQ com asfalto borracha

Fonte: Greca Asfaltos (2009).

Portanto, temos assim:

Tabela 6 – Custo do asfalto por tonelada.

CBUQ com CAP 50/70	R\$ 200,00 por tonelada	24.000 Fcfa por tonelada
CBUQ com Asfalto borracha	R\$ 230,00 por tonelada	27.600 Fcfa por tonelada

Fonte: Greca Asfaltos (2009)e Autor

Para comparação de custos e analisando os dados, chegou-se a uma estimativa de custo por quilômetro (km) de execução e manutenção das duas modalidades de acordo com a análise da greca asfaltos a seguir:

- Para o custo total para 1 km (1000 m) de manutenção e execução do asfalto borracha considerando a largura do pavimento de 7 m segundo o DNIT e o custo por metro quadrado de R\$83,95/m<sup>2</sup> teremos:

$$C_{AB} = 7 \times 1000 \times R\$83,95/m^2$$

$$C_{AB} = \mathbf{R\$587.650}$$

Portanto, o custo total para 1 km de manutenção e execução de asfalto borracha com uma largura de 7 metros seria de aproximadamente R\$587.650 ou 70.518.000 Fcfa quando convertemos em moeda local do Benim.

- Para o custo total para 1 km (1000 m) de manutenção e execução do asfalto convencional considerando a largura do pavimento de 7 m segundo o DNIT e o custo por metro quadrado de R\$93,77/m<sup>2</sup> teremos:

$$C_{AC} = 7 \times 1000 \times R\$93,77/m^2$$

$$C_{AC} = \mathbf{R\$656.390}$$

Consequentemente, o valor total para executar e realizar a manutenção de 1 km do asfalto convencional com uma largura de 7 metros seria cerca de R\$656.390 ou equivalente a 78.766.800 Fcfa quando convertido para a moeda local do Benim.

Em comparação, o custo total para 1 km de manutenção e execução do asfalto borracha (R\$587.650) é inferior ao custo equivalente do asfalto convencional (R\$656.390), indicando uma vantagem financeira na escolha do asfalto borracha para construção e manutenção de estradas, considerando valores do DNIT e custos por metro quadrado. Ao converter para a moeda local do Benim, o asfalto borracha permanece uma opção mais acessível.

De acordo com a Greca Asfaltos (2009, p.08):

Verifica-se, portanto, que o custo de aplicação do Asfalto Borracha é aproximadamente 15% superior ao custo de aplicação do CBUQ convencional. Essa elevação de custo visa compensar os gastos relacionados ao aumento das temperaturas durante o processo de usinagem da mistura asfáltica e para aprimorar a eficiência na compactação do revestimento.

As premissas consideradas para essa conclusão foram: o preço do CAP-50/70 de R\$1.150,00 por tonelada; o preço do asfalto borracha de R\$1.550,00 por tonelada; frete não incluído; devido à maior viscosidade do asfalto-borracha, assume-se um aumento de 0,5% no teor do ligante. (GRECA ASFALTOS, 2009, p. 23).

A análise feita com base nesta pesquisa em questão demonstra uma diminuição de cerca de 14% nos custos totais da obra, além de indicar uma necessidade menor de manutenção.

Para efeitos de comparação, um estudo conduzido em Goiânia em 2019, relacionado à pavimentação do Residencial Jardim do Cerrado III, comparou o uso de asfalto convencional com asfalto modificado por borracha proveniente de pneus inservíveis. Mendes (2019) adotou uma espessura uniforme de 3 cm para ambos os tipos de asfalto, iniciando assim a comparação com base em uma quantidade equivalente de massa asfáltica. A Tabela 7 apresenta os custos associados à usinagem e aplicação, totalizando o custo para a execução de ambos os tipos de asfalto, convencional CAP 50/70 e asfalto-borracha AB22. A análise visa proporcionar insights sobre a viabilidade econômica dessas abordagens.

Tabela 7: Custos de usinagem/aplicação e custos totais.

GRANDEZAS		CÁLCULO	UNIDADE 1	TIPO DE ASFALTO		UNIDADE 2	TIPO DE ASFALTO	
				CAP 50/70	ASFALTO BORRACHA (AB22)		CAP 50/70	ASFALTO BORRACHA (AB22)
A	Quantidade de massa asfáltica CBUQ		ton	5.013,26	5.013,26	ton	601.591,20	601.591,20
B	Custo de Usinagem 20% do CAP		R\$ / ton	371,5	420,04	Fcfa / ton	44.580,00	50404,8
C	Quantidade de massa x Custo de Usinagem	A x B	R\$	1.862.426,09	2.105.769,73	Fcfa / ton	223.491.130,80	252.692.367,60
D	Custo do CAP		R\$ / ton	1.857,50	2.100,20	Fcfa / ton	222.900,00	252.024,00
E	Custo de asfalto no CBUQ	A x D	R\$	9.312.130,45	10.528.848,65	Fcfa / ton	1.117.455.654,00	1.263.461.838,00
F	Custo total de obra	C x D	R\$	11.174.556,54	12.634.618,38	Fcfa	1.340.946.784,80	1.516.154.205,60

Fonte: Mendes (2019) e Autor

Ao analisar a Tabela 7, constata-se que o custo total de produção e aplicação do asfalto-borracha é 13,07% superior ao custo do asfalto convencional. No entanto, é crucial considerar os custos a longo prazo. Na Tabela 8, são apresentados os custos de manutenção ao longo de 7 anos nas vias do Residencial Jardim do Cerrado III. Essa análise visa proporcionar uma compreensão abrangente dos aspectos econômicos envolvidos em ambas as opções de asfalto.

Tabela 8 – 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\$)	Tipo de Asfalto	Custo de Execução (Fcfa)	Manutenção em %	Custo de Manutenção (Fcfa)	Custo de Execução e Manutenção (Fcfa)
Asfalto Convencional	11.174.556,54	70	7.882.189,59	19.056.746,15	Asfalto Convencional	1.340.946.784,80	70	945.862.750,80	2.286.809.538,00
Asfalto Borracha	12.634.618,38	10	1.263.461,84	13.898.080,22	Asfalto Borracha	1.516.154.205,60	10	151.615.420,80	1.667.769.626,40

Fonte: Mendes (2019) e Autor

A análise revela um custo total 37,12% superior para a aplicação e manutenção do asfalto convencional ao longo de 7 anos. Do ponto de vista da viabilidade econômica, destaca-se que o asfalto-borracha apresenta uma redução de custos ao longo de sua vida útil, resultante de sua menor demanda por manutenção.

### **3.7.2 VIABILIDADE AMBIENTAL**

Sob o aspecto ambiental, é viável explorar aspectos positivos e negativos. Os tópicos a seguir delineiam algumas características que comparam a viabilidade ambiental tanto no processo de reutilização de pneus descartados quanto na produção de asfalto modificado, que envolve métodos prejudiciais ao meio ambiente, assim como o asfalto convencional.

No âmbito positivo, destaca-se a economia de recursos naturais proporcionada pela reciclagem de pneus, a redução do uso de combustíveis não renováveis (como carvão e óleo) devido ao poder calorífico do pneu (SANTOS, BOTINHA, LEAL, 2013) e a diminuição da demanda por petróleo e asfalto ao incorporar borracha, resultando em maior durabilidade, vida útil prolongada e redução nas necessidades de manutenção (NOHARA et al, 2005).

Além disso, a redução dos riscos de incêndios e desastres ambientais é notável. Conforme Beduschi (2014), esses problemas derivam do descarte inadequado de pneus em locais irregulares, podendo obstruir corpos d'água e sofrendo degradação quando expostos ao solo.

Analogamente, destaca-se o risco reduzido de proliferação de doenças, como dengue e zika vírus, devido ao acúmulo de lixo e água nos ambientes de descarte de pneus.

A inclusão da borracha como agente modificador do asfalto contribui para a diminuição da quantidade de petróleo utilizado, representando um aspecto considerável para a saúde ambiental, conforme Santos, Botinha e Leal (2013).

Por outro lado, existem impactos negativos nesse acréscimo de borracha na modificação do asfalto.

O tempo estimado de decomposição dos pneus é de 600 anos, os danos que este material pode causar quando mal manuseado como resultado deste atraso (TEXACO, 2021).

Segundo Fortes (2014), os principais incluem o aumento da emissão de gases poluentes, que podem ser mutagênicos e cancerígenos, representando riscos à saúde humana. Além disso, há o odor forte resultante do processo de modificação do asfalto com borracha e da aplicação do produto na pista, bem como a emissão de fumaça gerada pelo uso de altas temperaturas durante a fabricação do asfalto modificado.

### 3.7.3 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).

A introdução de partículas de borracha pelo processo via úmida resulta em aumento de volume devido à absorção de óleos aromáticos do cimento asfáltico. Esse processo confere ao ligante modificado maior ductilidade, viscosidade aumentada, menor suscetibilidade térmica, resistência ao envelhecimento e maior capacidade de resistir à fissuração (SPECHT; CERATTI, 2003). Embora os benefícios da inserção da borracha por via seca sejam menores em comparação com o processo via úmida, ainda há melhorias nas propriedades estruturais do ligante, incluindo estabilidade, vida de fadiga, módulo de resiliência e menor suscetibilidade à deformação permanente (SPECHT, CERATTI, 2003).

A Greca Asfaltos (2009) realizou uma análise comparativa no Campus do Vale da UFRGS em Porto Alegre, examinando o desempenho do asfalto convencional em comparação com o asfalto borracha. Foram criadas pistas experimentais, conforme indicado na figura 8 subsequente, com a pista à direita utilizando asfalto convencional CBUQ e a pista à esquerda com asfalto borracha. Ambas as seções foram testadas por um simulador de tráfego linear DAER/UFRGS. Com uma carga de eixo de 10tf, a imagem mostra a pista com asfalto borracha após 123.356 ciclos, exibindo apenas uma trinca, enquanto a pista com asfalto convencional, após 90.303 ciclos, apresentou trincas completas.

Figura 9 - Simulador de tráfego de campo.



Fonte: Greca Asfaltos (2009).

A pesquisa conduzida pela Greca Asfaltos (2009) também investigou o desempenho em relação à deformação permanente em duas placas fabricadas com asfalto convencional e asfalto borracha. O teste foi conduzido por meio do simulador Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - LCPC. Conforme ilustrado na Figura 10 abaixo, observa-se que a placa à direita, com asfalto borracha, apresentou uma deformação de 5% após 30.000 ciclos de simulação, enquanto a placa à esquerda, feita com ligante convencional, deformou 13% após apenas 10.000 ciclos.

Figura 10 – Placas após simulador LCPC (laboratório).



Fonte: Greca Asfaltos (2009).

Após análise, conclui-se que o asfalto modificado com borracha apresenta um desempenho técnico superior ao asfalto convencional, resultando em uma vida útil mais prolongada e menor necessidade de manutenção ao longo do tempo, quando comparado aos asfaltos convencionais.

Uma pesquisa conduzida por Sanches, Grandini e Baierle Junior (2012) examinou a Rua Ângelo Domingos Durigan, em Curitiba, durante um recapeamento em 2005. Foram utilizados o asfalto convencional CAP 50/70 e o asfalto borracha AB8, mantendo a base do pavimento, diferenciando-se apenas nos últimos 5cm das camadas.

Sete anos depois, em 2012, os resultados comparativos foram apresentados, analisando as principais patologias identificadas em um trecho de 200m, dividindo ambos os tipos de pavimento. Cerca de 100m foram destinados a cada revestimento, buscando condições de tráfego semelhantes. Durante esse período, a rua esteve sujeita às mesmas condições climáticas.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta revisão bibliográfica tem como propósito apresentar os aspectos fundamentais relacionados à utilização do asfalto-borracha em Benim, estabelecendo uma comparação com os progressos alcançados globalmente nos últimos 10 anos, em contraste com o asfalto convencional, amplamente empregado no país.

O desafio da não utilização de asfalto modificado com pneus no Benim demanda investimentos específicos considerando a mão de obra qualificada por enquanto inexistente e a conscientização das empresas de construção. A incorporação de pneus reciclados nas estradas beninenses oferece vantagens econômicas, reduzindo custos de produção para construtoras e administrações locais. Apesar dos custos iniciais substanciais, o asfalto modificado com pneus traz benefícios em longo prazo em termos de sustentabilidade e eficiência para as infraestruturas rodoviárias.

A incorporação de pneus reciclados na construção de estradas no Benin traz consigo diversas vantagens econômicas que podem exercer impactos positivos na governança e nas atividades empresariais. Inicialmente, a adoção de pneus reaproveitados proporciona uma alternativa financeiramente viável à aquisição de materiais convencionais para a pavimentação, resultando na redução dos custos de produção. Esse aspecto mostra-se particularmente benéfico para as empresas do setor de construção e as administrações locais, que podem obter significativas economias de recursos financeiros.

Para incorporar esse tipo de asfalto nas infraestruturas rodoviárias, é essencial estabelecer processos de trituração específicos, envolvendo o uso de equipamentos especializados e máquinas adaptadas a essa tecnologia. Esses investimentos não se limitam apenas à fase de trituração, mas abrangem toda a cadeia de produção, desde a coleta de pneus inservíveis, passando pelo processo de trituração para obter os grânulos de borracha, a mistura com o ligante asfáltico, o transporte até a obra, o preparo do pavimento, a aplicação e a manutenção fechando o ciclo da cadeia de produção e a implementação nas estradas.

Além disso, a conscientização das empresas de construção de estradas é crucial para promover a adoção dessa tecnologia inovadora. Isso requer campanhas educativas para informar e capacitar os profissionais do setor sobre os benefícios ambientais e econômicos do uso de asfalto modificado com pneus. Essas iniciativas de conscientização contribuirão para superar possíveis resistências e facilitar uma transição bem-sucedida para práticas mais sustentáveis na construção de estradas. Em resumo, embora a adoção de asfalto modificado

com pneus envolva custos iniciais substanciais, os benefícios a longo prazo em termos de sustentabilidade e eficiência justificam esses investimentos necessários para o futuro das infraestruturas rodoviárias.

No quesito ambiental, a queima de pneus no Benin representa uma fonte significativa de danos ambientais. A incineração de pneus gera uma variedade de poluentes atmosféricos prejudiciais, incluindo compostos orgânicos voláteis, partículas finas e gases tóxicos como, por exemplo, o dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>), Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e outros. Essas emissões podem resultar na deterioração da qualidade do ar, com impactos adversos na saúde humana e no ecossistema circundante. Além disso, a fumaça gerada pela queima de pneus contém substâncias químicas nocivas que podem contaminar o solo e os corpos d'água próximos, contribuindo para a degradação da qualidade da água.

Os impactos em longo prazo dessa prática prejudicial podem comprometer a biodiversidade, a saúde pública e a sustentabilidade ambiental global do Benin. A implementação de soluções alternativas e políticas ambientais rigorosas torna-se imperativa para mitigar esses danos e promover práticas mais sustentáveis com o reaproveitamento desses pneus queimados na pavimentação.

Ao introduzir a borracha de pneus inservíveis como agente modificador do asfalto, observa-se uma otimização das características técnicas, resultando em maior resistência, durabilidade e elasticidade em comparação com o asfalto convencional.

Além dos benefícios técnicos, é relevante destacar que o asfalto-borracha apresenta um custo inicial de implantação aproximadamente 13 a 15% mais elevado devido aos seus métodos de produção. No entanto, ao considerar a manutenção ao longo do tempo, levando em conta as vantagens técnicas adquiridas, observa-se uma diminuição de cerca de 37%, conforme indicado por Mendes (2019), demonstrando ser financeiramente mais vantajoso em comparação ao asfalto convencional.

A implementação bem-sucedida do asfalto-borracha demanda não apenas conhecimento técnico, mas também a capacitação adequada da mão de obra e a utilização de equipamentos eficientes. Nesse sentido, é crucial estabelecer diretrizes para garantir a excelência na execução dessa tecnologia inovadora, ou seja, a capacitação da mão de obra com treinamento especializado proporcionando habilidades para a mão de obra envolvida na produção, execução e manutenção do asfalto-borracha.

É fundamental enfatizar que a finalidade dessas comparações vai além de ilustrar as vantagens e benefícios proporcionados pelo asfalto-borracha. Procura-se também conscientizar a sociedade e a busca pela inovação a criação de resoluções e normas técnicas

para o descarte inadequado, a reciclagem e o reaproveitamento de pneus inservíveis, destacando a relevância do estudo e identificando que é possível investir nesse caminho para sua implementação.

Dado o caráter significativo desse tema, esta revisão abre perspectivas para futuras investigações sobre diretrizes para aplicações do asfalto-borracha na pavimentação beninense, buscando aproveitar ao máximo as características inovadoras na compreensão técnico-científica acerca das diferenças entre os materiais estudados oferecidas, ao mesmo tempo em que abrangendo os princípios da sustentabilidade.

## 5 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**AASHTO M332-21** - Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. 2021.

**AASHTO T324-22** - Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures. 2022.

**Anthony, A.M.**, ingénieur en matériaux, ing., et C.F. Berthelot, ing., professeur associé, (n.d.). Preliminary Findings from Saskatchewan's Asphalt Rubber Project.

**ARAUJO, D. H.** Análise comparativa do asfalto borracha com o asfalto convencional e o asfalto com adição de polímeros. CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA -UNIFOR-MG CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL – TCC, 2015, f, 90.

**BEDUSCHI, E. F. S.** Utilização de pneus inservíveis na composição da massa asfáltica. Universidade do Oeste de Santa Catarina, Santa Catarina, 2014.

**BERNUCCI, L.B; ET AL,** Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2014.

**BERTOLLO, S. A. M.; FERNANDES JR., J. L.SCHALCH, V.** Benefícios da Incorporação de Borracha de Pneus em Pavimentos Asfálticos.

**BRITA, P.,** CBUQ X PMF: Você sabe a diferença?, 2017, disponível em : <http://britapinhal.com.br/novidades/detalhes/6/cbuq-x-pmf-voce-sabe-a-diferenca#:~:text=Em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20a%20custos%2C%20o,rela%C3%A7%C3%A3o%20a%20mistura%20a%20frio.>

**CCR,** Asfalto ecológico 2021, disponíveis em: [https://www.grupoccr.com.br/ri2010/asfalto\\_ecologico.html](https://www.grupoccr.com.br/ri2010/asfalto_ecologico.html) Acesso em: 05 jun. 2022.

**CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE E O DESENVOLVIMENTO** - UNICED/RIO-92. Agenda 21. In: SMA Agenda 21 Global. Disponível:<[http://www.cqgp.sp.gov.br/gt\\_licitacoes/publicacoes/AGENDA%2021%20GLOBA%20L%20CAP%C3%8DTULO%204.pdf](http://www.cqgp.sp.gov.br/gt_licitacoes/publicacoes/AGENDA%2021%20GLOBA%20L%20CAP%C3%8DTULO%204.pdf)>. Acesso em: 19 de out. 2011.

**DA SILVA, T. D. R.; OKIMOTO, F. S..** Resíduos de Pneu Inservíveis na Construção Civil. 2019. Disponível em: <https://www.cirsop.sp.gov.br/publicacoes/527>. Acesso em: 05 jun. 2022.

**DI GIULIO, G.** Vantagens ambientais e econômicas no uso de borracha em asfalto. *Reciclagem*, Campinas, 3, n. 3, 2007. 12-15.

**DNIT.** Manual de Pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE RECICLAGEM DE PNEUS E SEU USO NA FABRICAÇÃO DE ASFALTO ECOLÓGICO** - Revista Ciências do Ambiente On-Line Dezembro, 2010 Volume 6, Número 3.

**FAXINA, A.L.** Estudo em Laboratório do Desempenho de Concreto Asfáltico Usinado a Quente Empregando Ligante Tipo Asfalto-Borracha. Dissertação de Mestrado, EESC, São Carlos, SP, Brasil, 2002.

**FERRARI, J. S.; RIBEIRO, L. C. R. OLIVEIRA, P. C.** Potencial de Utilização de Pneus Usados em Pavimentação Asfálticas no BRASIL, 2003. Brasília, Universidade de Brasília – UnB.

**HEITZMAN, M.,** 1992. Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier, Washington D.C.: U.S. Department of Transportation- Federal Highway Administration.

**LETOFFE J. M., et al.** "Analyse thermique de bitumes routiers modifiés par des polymères." *BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES* (2000): 13-20. <http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/les-outils/portail-documentaire/ressources-enlignelibrairie/acceder-aux-sommaires-des-numeros-du-blpc-n201-a-n281/>.

**NBR 12949:** Concreto betuminoso usinado a quente – Procedimento, Rio de Janeiro, 2016.

**NBR 15166:** Asfalto modificado - Ensaio de separação de fase. Rio de Janeiro, 2014.

**NBR 15184:** Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2021.

**NBR 15529:** - Asfalto Borracha – Propriedades reológicas de materiais não newtonianos

por viscosímetro Rotacional. Rio de Janeiro, 2007.

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

**RAMOND, G et SUCH, C,** « Bitume et bitumes modifiés. Relation, Structures, Propriétés, Compositions ». Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (1990). 168, pp. 53-45.

**RODRIGUES, C.; RODRIGUES, L.** Estudo de viabilidade para fabricação de asfalto borracha na cidade de Alta Floresta – MT. Trabalho de conclusão de Curso – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS), 2022.

**ANCHES, F. G.; GRANDINI, F. H. B. JUNIOR O. 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) - Curso Superior de Engenharia de Produção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, 2012.

**SOUZA, L. D. F.; MOTA, K. R. R.** Estudo Comparativo da Viabilidade do Asfalto Convencional e o Asfalto-Borracha nas Vias Urbanas do Bairro Campestre em Monte Carmelo-MG. Monte Carmelo. 2019.

**SOARES. R.A.** O uso da borracha de pneus na pavimentação como uma alternativa ecologicamente viável. (Monografia) Universidade Católica de Salvador.

**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.

**TOUHARA R.** Étude de la résistance en fatigue des matériaux bitumineux. Diss. École de technologie supérieure, 2012.

**UNIÃO EUROPEIA,** Une méthode innovante recycle les vieux pneus en bitume routier, Março 2020, Disponívelna:<https://cordis.europa.eu/article/id/415404-innovative-method-recycles-old-tyres-into-road-bitumen/fr>.

**VUCOVIC, N.** Avaliação de alternativas para descarte e reuso de pneus: incorporação na massa asfáltica para produção de asfalto borracha. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade de São Paulo. São José dos Campos (SP),2021.

**WAY, G. B., KALOUSH, K. E. & BILIGIRI, K. P.,** .Asphalt- Rubber Standard Practice Guide, Arizona: Rubber Pavement Association, 2011.

**WARD N.** Caractérisation de nouveaux bitumes-caoutchouc. Mémoire de maîtrise et sciences appliquées, Université de Sherbrooke 2003, 107 p.

**Y. Tan, M. Guo, L. Cao, L. Zhang,** Performance optimization of composite modified asphalt sealant based on rheological behavior Construction and Building Materials, v. 47, p. 799–805 (2013).

**ZATARIN, A.P.M , SILVA, A.L.F , ANEMAM, L.S , BARROS, M.R , CRHISOSTOMO, W.** – Viabilidade da Pavimentação com Asfalto-Borracha, Revista gestão sustentabilidade ambiental, Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 649-674,out.2016/mar. 2017, file:///C:/Users/Usuario/Downloads/3323-10106-2-PB%20