

## Artigo Original

### Misturas asfálticas quentes modificadas por adição de borracha de pneu

Hot asphalt mixtures modified by adding tire rubber

Hortência Araújo Arruda de Lima<sup>1</sup>; Bárbara Ribeiro dos Reis Teixeira<sup>2</sup>; Ruth Maria da Silva Aires<sup>3</sup>

1. Engenheira Civil. Faculdade de Florianópolis – FAESF.

2. Engenheira Civil. Faculdade de Florianópolis – FAESF.

3. Engenheira Civil. Mestre em Engenharia dos Transportes – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo – PUC-SP. Discente – Engenharia Civil - Faculdade de Florianópolis – FAESF

#### Resumo:

Este artigo tem como principal objetivo o estudo bibliográfico da utilização da borracha triturada resultante do processo de recauchutagem de pneus para produção de misturas asfálticas quentes usadas na pavimentação. A metodologia foi baseada em literaturas específicas, teses e livros visando a síntese literária de artigos sobre misturas asfálticas modificadas por adição de borracha de pneus nos seus processos seco e úmido. Através do embasamento teórico demonstram-se a viabilidade e o intuito da utilização do asfalto modificado por borracha, observando as suas vantagens e desvantagens. Considerando os resultados obtidos, verificou-se que é viável usar o asfalto modificado, pois apesar do maior custo ele possui maior vida útil e melhor desempenho necessitando de menos manutenções além de colaborar com a diminuição de resíduos de pneus possibilitando seu uso em substituição ao asfalto convencional.

**Palavras-chave:** Asfalto modificado. Misturas asfálticas quentes. Borracha de pneus.

#### Abstract:

This article has as main objective the bibliographic study of the use of crushed rubber resulting from the tire retreading process for the production of hot asphalt mixtures used in paving. The methodology was based on specific literature, theses and books aiming at the literary synthesis of articles on asphalt mixtures modified by the addition of rubber tires in their dry and wet processes. The theoretical basis demonstrates the feasibility and purpose of using rubber-modified asphalt, observing its advantages and disadvantages. Considering the results obtained, it was found that it is feasible to use the modified asphalt, because despite the higher cost it has a longer useful life and better performance, requiring less maintenance, in addition to contributing to the reduction of waste tires allowing its use in replace of conventional asphalt.

**Keywords:** Modified asphalt. Hot mix asphalt. Crumb rubber.

## **INTRODUÇÃO**

A pavimentação tornou-se necessária no decorrer do tempo conforme o ser humano construiu estradas para se locomover e transportar cargas fazendo-se conveniente à dificuldade no transporte. Pavimentos asfálticos são compostos de múltiplas camadas, são elas: revestimento, base, sub-base e por fim reforço do subleito, sendo a parte do revestimento que recebe o fluxo de veículos e ações climáticas. Os pavimentos são utilizados em estradas, vias urbanas e rodovias, tendo o Brasil em torno de 12% de suas estradas pavimentadas. A escolha do pavimento deve levar em consideração o tipo de tráfego, solo, vida útil dentre outros fatores (ZAGONEL, 2013).

O asfalto é utilizado em mais de 99% das rodovias federais pavimentadas do país. A presença de defeitos no pavimento pode causar danos aos veículos, aumentar o tempo de viagem e o gasto de combustível. O objetivo primário da adição de borracha nas misturas asfálticas é melhorar o desempenho do pavimento. Investir em pavimentos de qualidade é de fundamental importância para o setor de transporte, pois no Brasil o transporte de carga e passageiros é feito em sua maior parte por rodovias. Além disso, nos últimos anos houve um aumento no fluxo de veículos e também no porte dos caminhões aumentando a exigência para esse tipo de infraestrutura (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT, 2019).

Segundo dados da Pesquisa CNT de Rodovias (2017), O Brasil possui 1.720.700 km de rodovias, destes apenas cerca de 213 mil são pavimentados, o que equivale aproximadamente 12,4% do total. Ainda segundo essa pesquisa, 48,3% da superfície total das rodovias avaliadas apresenta algum tipo de defeito no pavimento, tendo sido avaliado como Regular, Ruim ou Péssimo. Na mesma direção aponta O Tribunal de Contas da União (TCU) em seu Acórdão nº 328/2013, que o pavimento das rodovias federais apresenta problemas funcionais e estruturais precocemente, surgindo defeitos em média sete meses após a entrega da obra.

Dessa forma, salienta-se a importância dos estudos de aprimoramento das características dos pavimentos e o investimento em tecnologias nessa área. Essas pesquisas buscam compreender melhor os aspectos da adição de modificadores nas misturas asfálticas com o objetivo de melhorá-las para poder determinar métodos eficazes e vantajosos da sua aplicação.

De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), em 2016, os fabricantes e importadores de pneus novos comercializaram no mercado nacional mais de 53 milhões de unidades de pneus, o equivalente, em peso, a 729.214,03 toneladas.

Segundo dados da Associação Brasileira do Seguimento de Reforma de Pneus (ABR, 2018), reformar pneus é uma opção econômica, segura e ecologicamente correta; e em 2017, no Brasil, foram reformados 7,2 milhões de pneus de caminhões e ônibus, 4,3 milhões de pneus de automóveis e 480 mil fora-de-estrada, industrial e agrícola.

Existem três processos de reforma de pneus que são definidos pela ABR (2018) como: recapagem que é o processo pelo qual um pneu é reformado pela substituição de sua banda de rodagem; recauchutagem é o processo pelo qual um pneu é reformado pela substituição de sua banda de rodagem e dos ombros; e a remoldagem é o processo pelo qual um pneu é reformado pela substituição de sua banda de rodagem, dos seus ombros e de toda superfície de seus flancos (talão a talão).

A recauchutagem é o processo de reutilização de pneus usados através da retirada da sua banda de rodagem e aplicação de uma nova, aproveitando assim a carcaça e garantido mesmo desempenho de um novo (VIPAL BORRACHAS, 2012). Desse processo de recauchutagem sobra o resíduo da etapa de raspagem que pode ser destinado corretamente por algumas empresas, mas que muitas vezes é deixado sem tratamento em lixões, rios ou em terrenos a céu aberto podendo ser fonte de vetores de doenças e demorar anos para se decompor na natureza, estima-se que o tempo de decomposição dos pneus seja de 600 anos (ANDRIETTA, 2002). Além da poluição ambiental a fabricação de pneus demanda uma alta quantidade de matérias-primas, como aço, borracha natural e petróleo. Conforme a ABR (2018) o valor do pneu reformado é 75% mais econômico para o consumidor.

A indústria civil também é de importante relevância na preservação ambiental e está cada vez mais incorporando valores da ecologia, tanto para se adequar as exigências legais e do mercado quanto para aumentar a qualidade. Assim, neste trabalho foi buscado avaliar o uso do Resíduo de Recauchutagem de Pneus (RRP) ou borracha de pneus triturada em misturas asfálticas pelos processos seco e úmido apontando suas vantagens e desvantagens de acordo com resultados apresentados pela literatura.

## REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir será apresentado um apanhado teórico com base na revisão de literatura de autores notáveis no cenário da pavimentação sobre os conceitos básicos de pavimento e as variáveis que influem em sua qualidade e desempenho. Nos itens 4.2.1 e 4.2.2 são explicitados os materiais de produção do revestimento asfáltico, suas diferenciações e funções, além de características que interferem no comportamento do pavimento. No item 4.4 fala-se sobre a fabricação e as matérias primas da borracha de pneus e sobre sua introdução como modificador de misturas asfálticas. É feita a distinção entre os processos úmido e seco de incorporação de borracha nos itens 4.5 e 4.6 respectivamente. No item 4.7 apresentam-se os defeitos comuns dos pavimentos convencionais e no item seguinte, 4.8, mostra-se as vantagens e desvantagens de adicionar-se borracha de pneus em misturas asfálticas para operações de pavimentação.

## PAVIMENTO

O pavimento, de acordo com Bernucci *et al.* (2010), é “uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem” responsável por resistir às cargas oriundas do tráfego e às intempéries e proporcionar conforto e segurança aos usuários, tudo isso de forma durável. Os pavimentos podem ser divididos em rígidos (revestimento feito de concreto de cimento Portland) e flexíveis (revestimento de concreto asfáltico).

O pavimento “possui as seguintes camadas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito, sendo este último a fundação” (BALBO, 2007). O revestimento é a camada visível da via e que recebe diretamente as ações do tráfego. O revestimento asfáltico é constituído de agregados e um ligante asfáltico que pode ser o cimento asfáltico de petróleo (CAP) ou outros insumos betuminosos. A figura 1 ilustra as camadas de um pavimento flexível:

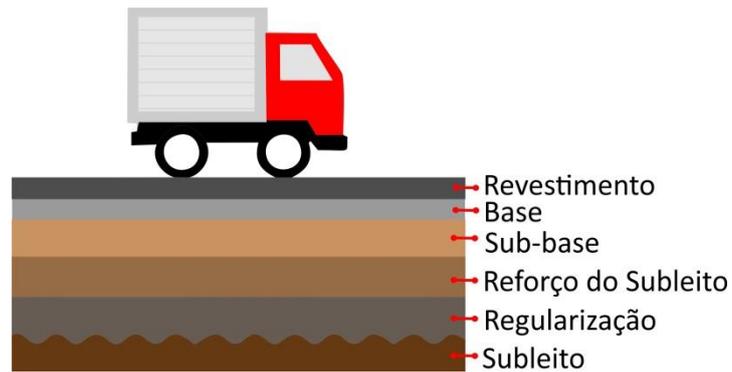


Figura 1: Pavimento flexível. Fonte: CNT, 2017.

## REVESTIMENTO

O revestimento é camada superior do pavimento que recebe diretamente as cargas dos veículos e das intempéries e as transmite as camadas inferiores. Essa camada deve ser impermeável para que a água não percole pelos estratos abaixo e também deve resistir aos esforços do contato entre o pneu e o pavimento. Hoje em dia já existem os pavimentos permeáveis que trazem outra proposta de forma de drenagem das águas pluviais (BERNUCCI *et al.*, 2010).

## Ligante

O betume pode ser definido como uma mistura de hidrocarbonetos solúvel no bissulfeto de carbono. O asfalto é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção, e que tem a propriedade de ser adesivo e impermeável (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A função primordial do asfalto (ligante) no pavimento é manter unidos os agregados da mistura, além de proporcionar aderência entre ela e a superfície onde será aplicado e conferir uma flexibilidade adequada à via para que ela resista ao tráfego e às condições climáticas sem apresentar deformações ou trincas precoces. Tal elasticidade é justificada pela característica desse material que é considerado termoviscoelástico, pois quando é aplicada uma carga externa

apresenta tanto a propriedade de viscosidade como de elasticidade e que dependem da temperatura (Confederação Nacional do Transporte - CNT, 2019).

## Agregados

Os agregados escolhidos devem suportar as tensões impostas na superfície do pavimento e também em seu interior. A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e influi efetivamente no comportamento dos revestimentos asfálticos intervindo em quase todas suas propriedades importantes como: rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc. (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Segundo Bernucci *et al.* (2010) e Roberts *et al.* (1996), existe uma série de fatores que contribuem para o adequado desempenho de uma estrutura. Para que o pavimento funcione apropriadamente é preciso selecionar as propriedades que o agregado deve conter. São primeiramente as propriedades físicas dos agregados que determinam sua aptidão para uso em misturas asfálticas quentes (em inglês HMA – *Hot Mix Asphalt*) e em menor extensão as propriedades químicas. As propriedades físicas/ mecânicas básicas, como resistência, porosidade e densidade, e as propriedades químicas e físico-químicas, como umidade, adesividade e em consequência o descolamento da película de asfalto são função da composição e estrutura dos minerais no agregado. As propriedades químicas dos agregados só têm mais influência sobre seu desempenho quando afetam a adesividade e a compatibilidade com aditivos antidescolamento.

Um dos principais fatores na falha da ligação agregado/betume é o tipo de agregado. Este tem uma influência considerável na adesão do ligante devido a diferenças no grau de afinidade pelo asfalto. Agregados ácidos ou eletronegativos (com um elevado teor de óxido de silício) como quartzo e granito são hidrofílicos e, portanto, mais suscetíveis à ação da água que agregados básicos ou eletropositivos como basalto e calcário. A consequência de o agregado ter maior atração pela água é ocasionar a perda da resistência da camada de revestimento gerando assim processo de trincamento e/ou deformações permanentes, desagregação, abertura de buracos e

reduzindo consideravelmente a vida útil do pavimento (CERATTI e REIS, 2011; WHITEOAK, 2003).

De acordo com *Asphalt Institute* (2007 apud CERATTI e REIS, 2011), a forma das partículas também influi nas características do asfalto como trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento. Partículas mais angulares como a pedra britada apresentam melhor intertravamento quando compactadas e partículas mais lamelares ou achatadas e alongadas tem mais facilidade de segregar-se durante a compactação ou vida de serviço, além de precisarem de mais ligante para preencher os Vazios do Agregado Mineral (VAM).

## DOSAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO

A dosagem de um concreto asfáltico baseia-se na escolha de um teor de ligante asfáltico, chamado teor ótimo, a partir de procedimentos experimentais e de uma faixa granulométrica pré-definida. Ele depende de parâmetros como forma e energia de compactação, tipo de mistura asfáltica, temperatura de serviço, etc. Esse teor ótimo é mais apropriadamente chamado de teor de projeto visto que varia com o critério de avaliação ou método de dosagem (CERATTI e REIS, 2011).

No Brasil o método de dosagem mais usado é o método de dosagem Marshall normatizado pelo DNER-ME 043/95, este método foi desenvolvido no *Mississippi Highway Department* por Bruce Marshall na década de 1940. Nos EUA o método mais utilizado é o SHRP-Superpave que foi desenvolvido para melhorar a escolha do teor de ligante, visto que o excesso de ligante na mistura provocava deformações permanentes prematuras durante a década de 1980 nas rodovias norte-americanas. A maior diferença entre os dois métodos é a forma de compactação: no Marshall é feita por impactos (golpes) e no Superpave é feita por esmagamento (giros) (BERNUCCI *et al.*, 2010).

## A BORRACHA DE PNEUS ADICIONADA NO ASFALTO

O processo de vulcanização da borracha foi descoberto em 1839, por Charles Goodyear, depois de muitos experimentos feitos por esse americano, ao aquecer uma amostra de borracha

e misturá-la com enxofre ela mantinha suas condições de elasticidade no frio ou no calor. A vulcanização se tornou um dos processos mais importantes da fabricação de pneus, já que tem a função de dar consistência à borracha. Esse processo possibilitou dar forma ao pneu, aumentar a segurança nas freadas e diminuir as trepidações nos carros (ANIP, 2018).

Apesar da aparência externa do pneu remeter sumariamente a borracha, sua composição é feita de diversos materiais, pois o pneu precisa adquirir características para rodar em diversas pistas como estradas pedregosas, enlameadas, desertos e até terras geladas. A quantidade de cada material na produção do pneu vai depender de seu tipo de uso. Assim, por exemplo, em pneus de carros de passeio feitos para rodar predominantemente em vias pavimentadas, a borracha sintética é mais usada que a borracha natural; já em pneus para caminhões de carga é mais usada a borracha natural, pois resiste melhor a cortes e rasgões (ANIP, 2018).

De acordo com Smith e Hashemi (2012, p. 379), a borracha sintética mais usada é o estireno-butadieno (do inglês *styrene-butadiene-rubber* - SBR) que é um copolímero de butadieno-estireno. Após polimerização o SBR contém de 20% a 30% de estireno. O aparecimento do estireno no copolímero atribui mais força e resistência à borracha. A borracha SBR tem menor custo que a borracha natural e por isso é utilizada em muitas aplicações, como por exemplo, nas bandas de rolagem de pneus. Apesar de maior resistência ao desgaste, esse material gera mais calor no pneu.

O negro fumo ou carbono amorfo ou carbono negro é frequentemente usado como preenchedor para borracha e é fundamental nos compostos de borracha, pois ele aumenta a resistência à abrasão e ao cisalhamento, além de deixar o pneu preto. Em geral quanto mais fina for a partícula de carbono negro, maior será a resistência a tração. O uso de preenchedores além de fortalecer o material também diminui o custo do produto (SMITH e HASHEMI, 2012, p. 378; ANIP, 2018).

Além desses materiais, o enxofre é essencial para a vulcanização somado a outros produtos químicos. E por fim o pneu possui uma malha de aço, náilon ou outros materiais que completa sua estrutura resistente (ANIP, 2018).

O gráfico a seguir mostra o diagrama tensão-deformação para a borracha natural vulcanizada e não vulcanizada:

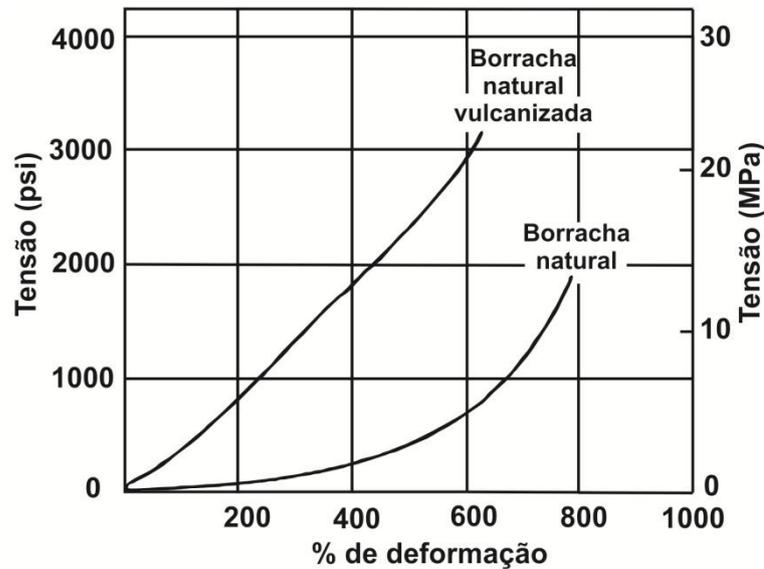


Figura 2: "A ligação entre os átomos de enxofre e cadeia polimérica do cis - 1,4 poli-isopreno por vulcanização aumenta a resistência da borracha vulcanizada." Fonte: SMITH e HASHEMI, 2012, p. 378.

Na década de 60, um engenheiro de materiais chamado Charles H. MacDonald que trabalhava na *U.S. Bureau of Public Roads*, hoje *Federal Highway Administration (FHWA)*, viajava pelo país para inspecionar fonte de materiais rodoviários para o *Bureau of Roads* quando utilizou uma mistura de asfalto com pó de borracha para selar trincas no teto de seu veículo. Ele percebeu que com o tempo a mistura com borracha não oxidava como as demais apenas de asfalto convencional, as quais se oxidavam e se tornavam frágeis após movimentos frequentes e longa exposição solar, permitindo assim a rachadura se refletir através da superfície de cada camada de asfalto sucessivo (SPECHT, 2004; WINTERS, 1989 apud CARLSON e ZHU, 1999).

Depois de aposentado, McDonald foi trabalhar na cidade de Phoenix, no estado do Arizona, e passou a usar sua mistura de asfalto com pó de borracha para reparar buracos nas ruas de Phoenix, ele deixava a mistura reagir por quarenta e cinco minutos à uma hora para que novas propriedades do material fossem obtidas, assim esse material adquiriu características benéficas de ambos os materiais base e ele o chamou de asfalto-borracha (*rubber-asphalt*). Ele usou esse material para criar "*band-aids*" para reparo de buracos. A patente do asfalto-borracha que impedia a utilização em larga escala expirou em 1992 (SPECHT, 2004; HUFFMAN, 1980 apud CARLSON e ZHU, 1999).

O processo de produção do asfalto borracha, que modifica o ligante asfáltico, é chamado via úmida. A incorporação da borracha em misturas asfálticas pode ser feito por dois processos: processo seco (*dry process*) e processo úmido (*wet process*). Esses dois processos serão descritos a seguir.

## PROCESSO ÚMIDO

No processo via úmida o pó de borracha ou borracha finamente triturada é adicionada ao Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) aquecido antes da mistura com os agregados, dando origem a um novo ligante asfáltico. O pó de borracha representa, nesse processo, de 15% a 20% da massa do ligante ou menos que 1,5% da massa da mistura. O novo ligante pode ser estocável ou não, sendo o não estocável resultado do processo de fabricação *continuous blending* e que é produzido na própria obra, e o estocável é conhecido como *terminal blending* produzido em indústria própria como borracha finíssima (BERNUCCI *et al.*, 2010).

O asfalto-borracha estocável é normatizado no Brasil pelo DNIT 111/2009 - EM: Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo "Terminal Blending". Segundo essa norma, para o uso do asfalto-borracha, inclusive do estocável, deve-se atender aos limites dos resultados dos ensaios indicados na tabela 1:

Características	Unid.	Asfalto Borracha		Método de Ensaio
		Tipo AB 8	Tipo AB 22	
Penetração, 100g, 5s, 25°C	0,1 mm	30-70	30-70	DNER ME 003/99
Ponto de Amolecimento, min, °C	°C	55	57	DNER ME-247/94
Viscosidade Brookfield, 175°C, 20rpm, Spindle 3	cP	800-2000	2200-4000	NBR 15529

Ponto de Fulgor, min	°C	235	235	DNER ME 148/94
Recuperação Elástica Ductilômetro, 25°C, 10cm, min	%	50	55	NBR 15086:2006
Estabilidade à Estocagem, máx.	°C	9	9	DNER ME-384/99
Efeito do calor e do ar (RTFOT) A 163°C:				
- Variação em massa, máx.	%	1	1	NBR 15235:2006
- Variação do Ponto de Amolecimento, máx.	°C	10	10	DNER ME-247/94
- Porcentagem de Penetração Original, mín.	%	55	55	DNER ME 003/99
- Porcentagem da Recuperação Elástica Original, 25°C 10cm, mín.	%	100	100	NBR 15086:2006

Tabela 1: Limites para ensaios de ligante asfáltico. Fonte: DNIT 111/2009-EM

\*Ensaio no resíduo do material resultante do ensaio NBR 15235:2006

Em grandes períodos de estocagem pode ocorrer a deterioração do CAP modificado por borracha fazendo com que ele perca suas qualidades. O tempo e as condições de estocagem devem ser determinados pelo fabricante. O tempo de digestão ou tempo de reação é o tempo necessário para a interação entre o asfalto e a borracha, quando misturados a altas temperaturas; ou o tempo de descanso entre a mistura e a sua compactação. Após determinado tempo de digestão, acontece uma alteração na viscosidade do ligante modificado por borracha, essa alteração está ligada a degradação do asfalto-borracha depois de certo tempo. Para aumentar a estabilidade à estocagem podem ser adicionados óleos extensores que conferem a possibilidade de se estocar o asfalto-borracha por até seis dias sem ocorrer degradação (BALAGUER, 2012; CALTRANS, 2003; SPECHT, 2004; TAKALLOU e SAINTON, 1992).

No processo úmido “são necessárias unidades especiais para a dosagem, com tanques para misturação em elevada temperatura para que ocorra a reação adequada entre o ligante e a borracha até que a viscosidade seja estabilizada”. Dessa forma, os custos de viabilização dos

equipamentos tornam o processo úmido mais caro em comparação ao seco que não precisa de equipamentos especiais ou mudanças significativas na usina (BERTOLLO, 2002).

A principal mudança no sistema da mistura de asfalto-borracha é o inchaço da borracha devido à interação e migração dos constituintes do asfalto, resultando na formação de uma rede molecular reticulada de asfalto-borracha. O inchaço da borracha provoca o aumento da viscosidade o que é uma preocupação para condições satisfatórias de bombeamento e mistura. O aquecimento do asfalto borracha durante o processo de cura induz algumas quebras nas ligações reticuladas de borracha sendo este processo considerado como desvulcanização. Esse fenômeno também é conhecido como a degradação inicial das cadeias poliméricas e induz uma diminuição progressiva da viscosidade. Ambos os acontecimentos inchaço e desvulcanização estão presentes durante a cura do asfalto borracha, mesmo para o processo seco (a borracha é introduzida como agregado). A predominância de um dos fenômenos depende essencialmente da temperatura e duração da mistura (SPEIGHT, 2016, p. 472). A figura 3 ilustra o aumento da viscosidade do asfalto-borracha:



Figura 3: Exemplo de maior consistência do asfalto-borracha no momento da usinagem.

A) Asfalto convencional. B) Asfalto-borracha. Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2010.

## PROCESSO SECO

No processo seco, a borracha triturada substitui parte dos agregados pétreos da mistura, que são aquecidos e posteriormente acrescenta-se o cimento asfáltico formando um produto denominado concreto asfáltico modificado com adição de borracha (em inglês RUMAC – *Rubber*

*Modified Asphalt Concrete*). O processo seco só deve ser utilizado em concretos asfálticos usinados a quente como CBUQ (BERNUCI *et al.*, 2010).

O processo via seca usa de 2 a 4 vezes mais *Crumb Rubber Modified* (CRM) que o processo úmido, aproximadamente 3,5% do peso total da mistura em partículas borracha, sendo que o tamanho das partículas geralmente usadas é maior (1,6 – 6,4 mm). A primeira aplicação do processo seco nos Estados Unidos foi pelo processo chamado *Plus Ride*. O número de vazios desejado nesse procedimento vai de 2% a 4% (dependendo do volume de tráfego) e é um critério de determinação do teor ótimo de ligante que varia de 7,5% a 8% para esses valores. Esse processo foi desenvolvido originalmente na Suécia denominado inicialmente *Rubit* (ROBERTS *et al.*, 1996; SPECHT, 2004; BERTOLLO, 2002; CPR, 2017).

Nas misturas asfálticas que incorporaram borracha pelo processo via seca uma pequena parte da borracha-agregado reage com o aglutinante e a outra parte preenche os vazios do agregado mineral, essa mistura esta representada na figura4. Recomendam-se agregados de granulometria descontínua onde a borracha entra em substituição a uma parte dos agregados (SPECHT, 2004; TAKALLOU e SAINTON, 1992).

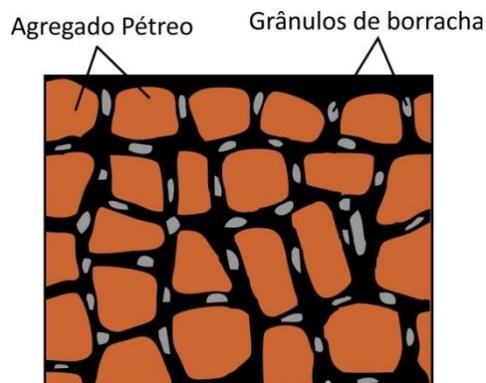


Figura 4. Representação de Concreto Asfáltico Modificado por Borracha (CAMB), pelo processo seco. Fonte: Takallou e Hicks (1988).

As vantagens do processo seco em relação ao úmido são menor custo de produção e maior consumo de borracha triturada. Apesar disso as pesquisas científicas se concentram no processo úmido. Isso se explica em parte por que alguns trechos experimentais com o processo seco apresentaram problemas. Além disso, o processo úmido está mais bem fundamentado e possui equipamentos especiais para produzi-lo. Este processo resulta em um revestimento com melhor desempenho e maior vida de serviço (BERTOLLO, 2002).

## PATOLOGIAS

O estado da superfície da via é o mais importante do ponto de vista do usuário, pois é perceptível através da confortoabilidade que o rolamento trás. A partir do momento em quem isso é afetado significa que também afetara o veículo, trazendo custos adicionais como peças de manutenção, maior consumo de combustível, pneus e outros. Os defeitos apresentados nas superfícies podem aparecer a longo prazo e precocemente, e são ocasionados por erros de projetos, inadequações construtivas, falta de manutenção e conservação. Para se classificar os defeitos utiliza a norma DNIT 005/2003-TER – Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos – terminologia, através desta norma os tipos de defeitos são catalogados em um quadro, mostrando o resumo das degradações as codificações e a classificação, junto com sua representação e ilustrações fotográficas.

Fendas: segundo o DNIT, 2003 se trata da descontinuidade da superfície do pavimento. Aquelas que são perceptíveis ao olho nu com apenas a uma distância inferior a 1,5m, são posicionadas longitudinal, transversal ou obliquamente ao eixa da via são consideradas fissuras, já quando a abertura é superior a 1,5m se considera trinca. A trinca pode apresentar-se sob a forma de trinca isolada ou trinca interligada, como mostra a figura 5:



Figura 5 – Trinca Interligada do tipo “couro de jacaré”. Fonte DNIT 005/2003.

Afundamento: DNIT, 2006. A deformação permanente dada por uma depressão na superfície do pavimento apresenta-se como afundamento plástico ou de consolidação. Quando há extensão for superior a 6m e é causado pela fluência plástica de uma ou mais camada do pavimento acompanhada de solevamento, localizado ao longo da trilha se denomina

afundamento plástico da trilha de roda. Quando não há acompanhamento de levantamento e é até 6m de extensão é denominado afundamento de consolidação local, quando for superior e estiver ao longo da trilha de roda é denominada afundamento de consolidação de roda.

Desgaste: é o desprendimento do revestimento asfáltico, é caracterizado pela aspereza na superfície e é provocado por esforços tangenciais causados pelo tráfego, mostrado na figura 6. DNIT 2003. De acordo com CNT (2016), apenas 32% das superfícies estão em perfeito estado. Sendo que quase a metade se encontra desgastado, figura 7.



Figura 6 - Desgaste da superfície asfáltica. “Fonte DNIT 005/2003”.

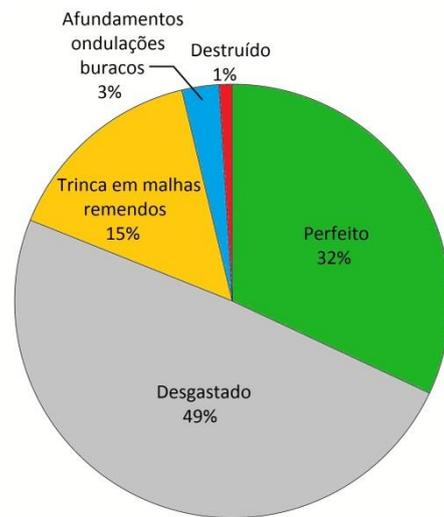


Figura 7 - Condições da superfície do pavimento em rodovias federais públicas em 2016 (em %). “Fonte CNT, 2016”.

Buracos: cavidade na superfície causada principalmente pela falta de aderência entre camadas, podendo alcançar camadas inferiores do pavimento.

Remendo: apesar de esta relacionado a conservação da superfície, é um tipo de defeito que se caracteriza pelo preenchimento dos buracos ou de qualquer orifício que a superfície apresenta. Quando há substituição do revestimento de uma ou mais camadas inferiores do pavimento e apresenta em forma retangular é conhecido do remendo profundo. Quando é preciso fazer uma correção em uma determinada área da superfície com aplicação de uma betuminosa chama-se remendo superficial. DNIT 2003.

Em meios a tanto defeitos que o asfalto convencional acarreta, as fissuras e as trincas são as que estão presentes na pavimentação. Segundo Bernucci *et al.* (2010), os pavimentos com adição de borracha possuem maior resistência ao trincamento e a deformações permanentes,

isso se dá através da absorção das propriedades da borracha uma vez que ela possui propriedade elástica capaz de absorver impactos dos veículos. Além da propriedade elástica, ela possui uma substância como o negro de fumo (*black carbon*) que protege o asfalto contra o desgaste químico sequente da exposição dos raios ultravioletas e infravermelhos que estão muito presente no país, assim evita o envelhecimento precoce do asfalto. O asfalto borracha proporciona uma melhor aderência do pneu no pavimento, reduz o ruído, retarda o envelhecimento e aumenta a resistência a fadiga e a formação de trilhos de roda, além de dar um destino apropriado aos pneus, ajudando o meio ambiente. Quanto ao alto custo que ele apresenta devido ao material usado na fabricação do asfalto borracha em contrapartida sua manutenção é de baixo custo.

#### VANTAGENS E DESVANTAGENS

A adição da borracha nas misturas asfálticas traz benefícios como: diminuição das deformações permanentes (trilhas de roda), redução do envelhecimento com a redução da oxidação, diminuição do ruído da passagem dos pneus e uma melhor aderência pneu-pavimento acarretando a diminuição do risco de derrapagem em pista molhada, além do viés ambiental por consumir pneus inservíveis descartados da natureza. (CNT, 2019; BERTOLLO, 2002).

Em contrapartida a borracha aumenta a viscosidade do concreto asfáltico, o que requer maiores temperaturas de mistura e aplicação (CNT, 2019). Segundo Zanetti *et al.* (2016), materiais betuminosos que contém borracha triturada de pneus têm potenciais efeitos perigosos provocados pelas emissões gasosas liberadas durante as operações de pavimentação. Durante a aplicação na pista a mistura libera gases tóxicos nocivos à saúde dos trabalhadores. Apesar dessa correlação, de acordo com esse estudo, a análise da literatura disponível revela que existe uma falta de compreensão do verdadeiro motivo do aumento aos riscos a saúde, se houver, causados pela adoção de tal tecnologia de pavimentação em substituição as tradicionais. Ao adotar a pavimentação padrão como referência, concluiu que as emissões provenientes de misturas asfálticas com borracha e que levam a riscos tóxicos e cancerígenos para os trabalhadores da construção são comparáveis aos das misturas de pavimentação convencional de betume puro ou ligantes modificados com polímeros. Além disso, de acordo Roberts (1996,

p.459) a reciclabilidade do asfalto fica comprometida por conta da borracha, se tornando outro problema o descarte do material gerado no corte da fresagem.

## MÉTODOS DE ANÁLISE

Este estudo é uma pesquisa de revisão bibliográfica feita através do levantamento dos conhecimentos acerca do tema em fontes bibliográficas como livros, artigos, teses e relatórios disponíveis em plataformas de pesquisa como ScienceDirect, Scielo, periódicos CAPES e Google Acadêmico. Essa pesquisa foi feita com ajuda da bibliometria que é um método quantitativo e estatístico de avaliação da produção científica, usado aqui com o intuito de apurar os resultados das pesquisas e ajudar na escolha de resultados mais qualificados.

Para todo tipo de pesquisa, independentemente do método, é necessário que haja um levantamento de dados de variadas fontes. Segundo Marconi e Lakatos (2003), o levantamento de dados é feito de duas formas: pesquisa documental ou pesquisa bibliográfica. O presente estudo trata-se de pesquisa bibliográfica, que engloba “toda bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo” e tem a finalidade de familiarizar o autor com todo conteúdo já publicado seja ele escrito ou gravado. Dessa forma, dando-se ao pesquisador o *back-ground* para a análise de um tema sob uma nova perspectiva (MARCONI E LAKATOS, 2003).

Este trabalho se enquadra na classificação de pesquisa explicativa sem procedimentos experimentais. Tal pesquisa destina-se a síntese, teorização, análise e interpretação do tema em estudo buscando identificar e explicar as causas de determinado problema do objeto de estudo.

## BIBLIOMETRIA

A bibliometria trata da aplicação de métodos matemáticos e avaliação das atividades de produção do conhecimento científico. Segundo Alvarado (1984, p. 91) existem três leis básicas da bibliometria que são: a Lei de Bradford, que descreve a distribuição da literatura periódica numa área específica; a Lei de Lotka, que descreve a produtividade dos autores; e a Lei Zipf, que descreve a frequência do uso de palavras num determinado texto. Assim a principal diferença entre a bibliografia tradicional e a bibliometria é que esta utiliza mais métodos quantitativos que discursivos (ARAÚJO, 2006, p.12).

A bibliometria também ajuda a identificar em que patamar a pesquisa situa-se de acordo com índice M definido por BANKS (2006) como uma relação entre número de citações de um tópico em determinado período e o número de anos decorrido a partir do primeiro artigo publicado do assunto até o momento, de acordo com a seguinte formula:

$$\text{Índice M} = \frac{h - \text{index}}{N} \quad (1)$$

Onde:

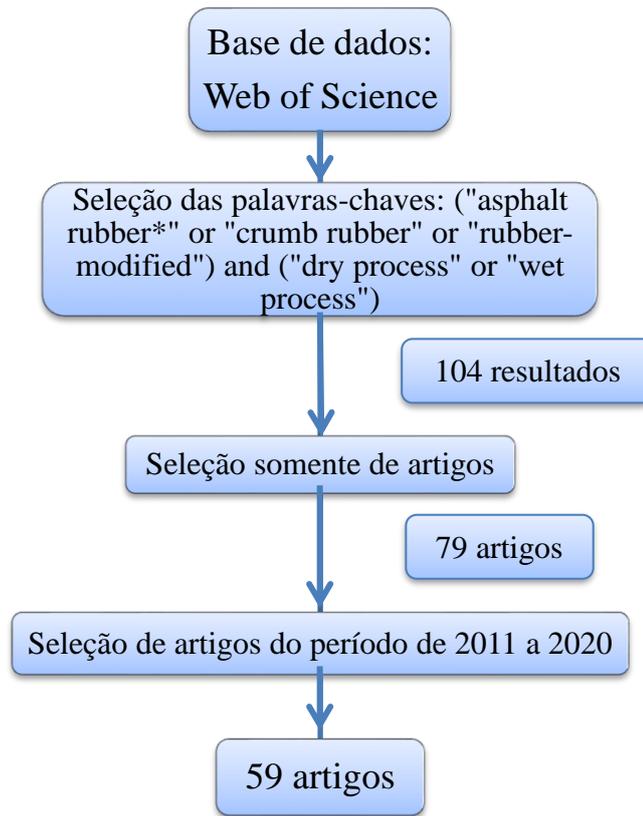
- h – *Index* = índice baseado no número de citações de um tópico ou combinação.
- N = Quantidade de anos a partir da primeira publicação.

Com base no índice M classifica-se a pesquisa de acordo com o quadro abaixo:

Índice M	Tópico/Combinação
$0 < M \leq 0,5$	De interesse dos pesquisadores de um campo específico de pesquisa, representado por uma pequena comunidade.
$0,5 < M \leq 2$	Área de pesquisa “ <i>hot topic</i> ”, em que a comunidade é muito grande ou é um composto com características muito interessantes ou excelentes.
$M > 2$	Tem influência de longo alcance, além da sua própria área de pesquisa. É provável que seja um composto com características e fins de aplicação únicos.

Quadro1: Classificação da pesquisa de acordo com índice M. Fonte: BANKS (2006).

A base de dados *Web of Science* foi escolhida, pois é uma das principais bases de dados de artigos científicos, sendo ideal para estudo bibliométrico. O uso de *keywords* adequadas é fundamental para a qualidade da busca e essas palavras-chave são separadas por operadores booleanos, *and* e *or*, que servem para restringir ou abranger a pesquisa respectivamente. Um tópico significa a busca de *keywords* em títulos, resumos e palavras chaves dos artigos (CLEMENTE e GALVÃO, 2018). Assim, a partir da plataforma de busca da *Web of Science*, utiliza-se palavras-chave e filtros para focalizar a busca de publicações para o tema requerido. A análise foi feita usando palavras chaves da de acordo com o fluxograma a seguir:

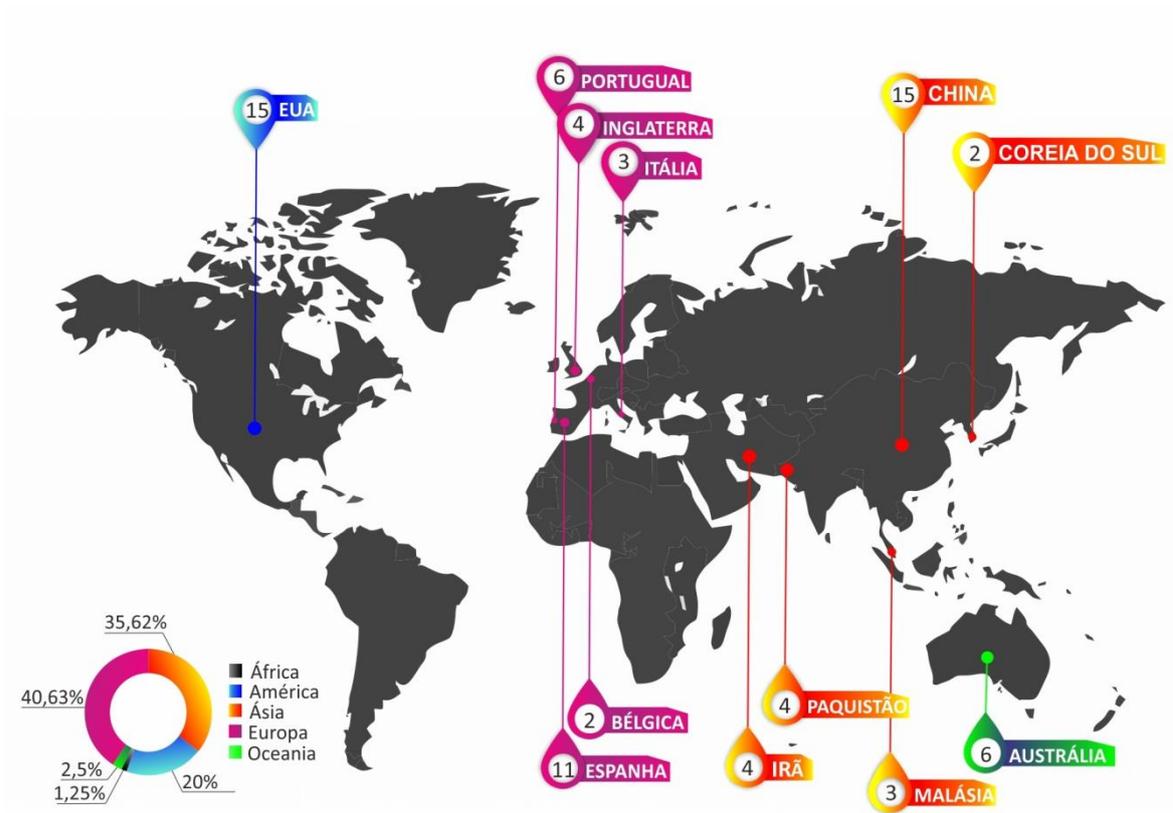


Fluxograma1: Procedimento de pesquisa. Fonte: elaborado pelas autoras (2020).

## ANÁLISE E RESULTADOS

Através da revisão da literatura foi possível reunir os resultados obtidos em outras pesquisas e artigos de relevância para chegar-se a uma conclusão sobre a viabilidade do uso de misturas asfálticas modificadas por borracha. O  $h$  – *index* fornecido pelo site através da combinação do fluxograma1 foi de 16 e o  $N$  foi de 25 (primeira publicação em 1996). Assim o índice  $M$  calculado de acordo com fórmula (1) foi de 0,64 classificando-se com um *hot topic*. O mapa1 apresenta a distribuição por países dos artigos publicados no período de 1995 a 2020 em *Web of Science* e encontrados a partir dos resultados apresentados na busca feita conforme o fluxograma1. A Europa foi o continente que mais teve publicações, com 32 publicações no total, enquanto o continente Africano e a Oceania só tiveram 1 e 2 publicações respectivamente nesse período. O mapa destaca apenas os países com mais publicações, alguns deles com apenas 1 ou 2 publicações foram omitidos por conta do espaço, mas estão todos representados no gráfico

em fatias no canto.



Mapa1. Fonte: elaborado pelas autoras (2020).

Os artigos seleccionados com ajuda da bibliometria foram reunidos no Quadro 2 e em seguida estão compilados os resultados.

AUTORES	ANO	TÍTULO
F. Saberi.K et al.	2017	<i>Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber</i>
WANG et al.	2019	<i>Waste tire recycling assessment: Road application potential and carbon emissions reduction analysis of crumb rubber modified asphalt in China</i>
ESKANDARSEFAT Shahin et al.	2018	<i>Recycling asphalt pavement and tire rubber: A full laboratory and field scale study</i>
YANG Xiaolong et al.	2019	<i>Effect of microwave-activated crumb rubber on reaction mechanism, rheological properties, thermal stability, and released volatiles of asphalt binder</i>

SOULIMAN I. Mena <i>et al.</i>	2016	<i>Cost-effectiveness of rubber and polymer modified asphalt mixtures as related to sustainable fatigue performance</i>
--------------------------------	------	---

Quadro2: Artigos selecionados entre os anos e 2014 a 2020 em ScienceDirect.

O estudo de F. Saberi.K *et al.* investiga o uso de borracha triturada e pavimento asfáltico reciclado em misturas asfálticas mornas com o objetivo de melhorar o desempenho da pavimentação asfáltica e mitigar impactos ambientais causados por resíduos de pneus, pavimentos asfálticos envelhecidos, além da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) liberados através da implantação de pavimento asfáltico. Para a produção dessa mistura foi utilizado o aditivo orgânico *Sasobit* que permite reduzir as temperaturas de mistura e compactação por meio da redução da viscosidade do asfalto. Os resultados da pesquisa mostram que a mistura empregada proporcionou um melhor comportamento contra a suscetibilidade à umidade, trincas por fadiga e deformação em comparação com a mistura de controle.

Resultados do trabalho de Eskandarsefat *et al.* apresentam que há um ganho nas propriedades de resistência à derrapagem nas misturas com borracha triturada em termos de macro e micro textura do revestimento, quando sujeitas à controles adequados de projeto e fabricação da mistura.

De acordo análise de desempenho realizado por Wang *et al.*, a borracha triturada pode ser usada como um método eficiente e ecológico para reciclar pneus em fim de vida. Expandir a proporção de aplicação de asfalto em pó de borracha é um método eficaz para equilibrar a contradição de oferta e demanda de borracha triturada, equilibra também a contradição sobre o potencial de economia de energia e redução de emissões, além dos benefícios econômicos do uso de asfalto modificado por borracha triturada, são significativamente maiores do que aqueles que empregam asfalto modificado com estireno-butadienoestireno (SBS). Neste estudo, a economia de energia e a redução de emissões foram calculadas e analisadas com base nos parâmetros de consumo de materiais fornecidos em um estudo prático, porque não há um padrão reconhecido para o consumo de materiais de engenharia.

Segundo o estudo de Yang *et al.* o tratamento por micro-ondas da borracha triturada pode reduzir a geração de gases tóxicos no asfalto de borracha, no entanto, em fase posterior da

pirólise do asfalto, a ativação das partículas de borracha tiveram pouco efeito sobre os voláteis liberados.

Os resultados do trabalho de Souliman *et al.* indicam que o asfalto borracha e o asfalto modificado por polímero feitos com agregados de granulometria *gap graded* teriam vida útil muito mais longa em relação à mistura de referência. Além disso, uma análise mecânica usando o software 3D-Move, juntamente com um estudo de análise de custo-benefício baseado no desempenho da fadiga nas três misturas mostrou que as misturas modificadas exibiam custo-benefício significativamente maior (ciclos maiores por custo de uma milha) em comparação à mistura de HMA não modificada. Em média, essa relação para o asfalto borracha foi 4,1 vezes maior que a mistura não modificada.

## CONCLUSÕES

Tendo em vista tudo que foi dito, considera-se que o uso de borracha de pneus como modificador de misturas asfálticas quentes tem influência positiva nos revestimentos pavimentados com essa tecnologia por gerar características benéficas em comparação ao revestimento asfáltico convencional como resistência a deformação permanente, resiliência ao surgimento de trincas por fadiga e por mudanças de temperatura. Entretanto, por provocar mudanças na viscosidade, requer maiores temperaturas durante o processo de preparo que as misturas sem adição de borracha. Isso torna esse processo mais caro o que é compensado pelo menor número de manutenções ao longo da vida de serviço do pavimento e assim seu custo-benefício é viável. É necessário atentar-se também aos prejuízos que essa técnica pode causar como danos a saúde dos trabalhadores provocados pelos fumos gasosos emitidos no processo e a impossibilidade da reciclagem desse revestimento. Assim, sugere-se para trabalhos futuros buscar-se compreender os mecanismos que atuam nestas desvantagens e assim tentar minimizá-las.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABR. **Produção e consumo sustentáveis**. 2018. Disponível em: < <http://abr.org.br/dados-do-segmento/>>. Acesso em: 28/03/2020.
- ALVARADO, U. R. **A bibliometria no Brasil**. P. 91-95. Brasília: Ci. Inf., 1984. Disponível em: <<http://www.ijsn.es.gov.br/bibliotecaonline/Record/343663>>. Acesso em: 06/07/2020.

- ANDRIETTA, A. J. **Pneus e meio ambiente: um grande problema requer uma grande solução.** (2002). Disponível em:< <https://pt.scribd.com/doc/15706935/Pneus-e-Meio-Ambiente>>. Acesso em: 03/03/2020.
- ANIP – Associação Nacional da Indústria dos Pneumáticos. **A Fabricação do Pneu: Matérias-primas.** 2018. Disponível em:< <http://www.anip.org.br/fabricacao/>>. Acesso em: 04/06/2020.
- ANIP – Associação Nacional da Indústria dos Pneumáticos. **Quase 200 Anos de Tecnologia.** 2018. Disponível em:< <http://www.anip.org.br/historia-e-fabricacao/>>. Acesso em: 04/06/2020.
- ARAÚJO, A. C. **Bibliometria: evolução histórica e questões atuais.** Porto Alegre : Em Questão, v. 12, n. 1, p. 11-32, 2006. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/EmQuestao/article/view/16>. Acesso em: 06/07/2020.
- BANKS, G. M. **An extension of the Hirsch index: Indexing scientific topics and compounds.** Scientometrics Vol. 69, Nº 1, p. 161–168. Budapest: Akadémiai Kiadó, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11192-006-0146-5>>. Acesso em: 05/07/2020.
- BALAGUER, Marcos. **Avaliação estrutural de um pavimento flexível executado em asfalto-borracha elaborado pelo processo de produção contínua em usina.** Tese de mestrado. Instituto Militar de engenharia, Rio de Janeiro. 2012.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** 3ª reimpressão. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2010.
- BERTOLLO, S. A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus.** São Carlos, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 198p.
- CALTRANS. **Maintenance Technical Advisory Guide (TAG).** California: State of California Department of Transportation, Materials and Testing Services, Office of Flexible Pavement Materials, 2003.
- CARLSON D. Douglas; ZHU H. **Asphalt-Rubber - An Anchor to Crumb Rubber Markets.** International Rubber Forum Veracruz, México, 1999.
- CERATTI, J. A. P; REIS, R. M. M. **Manual de dosagem de concreto asfáltico.** São Paulo: Oficina de textos; Rio de Janeiro: Instituto Pavimentar, 2011.
- CLEMENTE D.; GALVÃO G. Curso de difusão USP - **Bibliometria: teoria e prática.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2018.
- CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Transporte rodoviário: impactos da qualidade do asfalto sobre o transporte rodoviário.** – Brasília: CNT, 2019. Disponível em: < <https://cnt.org.br/impactos-qualidade-asfalto-transporte-rodoviario>>. Acesso em: 08/06/2020.
- CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** – Brasília: CNT, 2017. Disponível em: < <https://cnt.org.br/por-que-pavimentos-rodovias-nao-duram>>. Acesso em: 08/06/2020.
- CPR - Centro de Pesquisas Rodoviárias. **Asfalto Borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas.** Relatório Número: CCR-ND-AB- RF-DEZ/2017 Nova Dutra: Grupo CCR, 2017.
- ESKANDARSEFAT Shahin *et al.* **Recycling asphalt pavement and tire rubber: A full laboratory and field scale study.** Construction and Building Materials 176 (2018) 283–294. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818310985>>. Acesso em: 08/07/2020.
- F. Saberi.K et al. **Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber.** Journal of Cleaner Production 165 (2017) 1125-1132, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261731507X>>. Acesso em: 07/07/2020.
- IBAMA. **Relatório pneumáticos, resolução CONAMA nº 416/09.** 2017. Disponível em: < <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/pneus/relatoriopneumaticos/ibama-relatorio-pneumaticos-2017-nov.pdf>>. Acesso em: 26/03/2019.

MARCONI, A. Marina; LAKATOS, M. Eva. **Fundamentos de metodologia científica**. 5ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2003.

OLIVEIRA, O. J. de; CASTRO, R. de. **Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil**. Foz do Iguaçu: UNESP, 2007. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007\\_tr650481\\_0291.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_tr650481_0291.pdf)>. Acesso em: 15/06/2020.

ROBERTS, F.L. et al. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction**. 2. ed. Lanham, Maryland: Napa Research and Education Foundation, 1996.

SMITH F. William; HASHEMI Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciências dos Materiais**. 5ª ed. AMGH Editora Ltda.2012.

SPECHT, L.P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. 279p.

SPEIGHT G. James. **Asphalt materials science and technology**. Orxford: Elsevier. ISBN: 978-0-12-800273-5. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/book/9780128002735/asphalt-materials-science-and-technology>>. Acesso em 11/06/2020.

SOULIMAN I. Mena *et al.* **Cost-effectiveness of rubber and polymer modified asphalt mixtures as related to sustainable fatigue performance**. Procedia Engineering 145 (2016) 404 – 411. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581630011X>>. Acesso em: 18/07/2020.

TAKALLOU H. B.; HICKS, R. G. **Development of Improved Mix and Construction Guidelines for Rubber-Modified Asphalt Pavements**. Oregon: Transportation Research Record n. 1171, p. 113-120, 1988.

TAKALLOU, B. H.; SAINTON A. **Advances in Technology of Asphalt Paving Materials Containing Used Tire Rubber**. Transportation Research Record. Washinton, n 1339, p 23-29.1992.

TCU – Tribunal de Contas da União. **ACÓRDÃO 328/2013**. 2013. Disponível em: <[https://pesquisa.apps.tcu.gov.br/#/documento/acordao-completo/\\*KEY%253AACORDAO-COMPLETO-1263618/DTRELEVANCIA%2520desc/0/sinonimos%253Dfalse](https://pesquisa.apps.tcu.gov.br/#/documento/acordao-completo/*KEY%253AACORDAO-COMPLETO-1263618/DTRELEVANCIA%2520desc/0/sinonimos%253Dfalse)>. Acesso em: 08/06/2020.

VIPAL BORRACHAS. **Processo de Reforma de Pneus**. 2012. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=SmwQRxkvKdU>>. Acesso em: 15/06/2020.

WANG Qing-Zhou et al. **Waste tire recycling assessment: Road application potential and carbon emissions reduction analysis of crumb rubber modified asphalt in China**. Journal of Cleaner Production 249 (2020) 119411. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619342817>>. Acesso em: 07/07/2020.

WHITEOAK, D. **The Shel Bitumen Handbook**. Fifth edition. Chertsey, UK: Shell Bitumen, 2003.

YANG Xiaolong *et al.* **Effect of microwave-activated crumb rubber on reaction mechanism, rheological properties, thermal stability, and released volatiles of asphalt binder**. Journal of Cleaner Production 248 (2020) 119230. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619341009>>. Acesso em: 08/07/2020.

ZAGONEL, Ana Regina. **Inovações em revestimetnos asfálticos utilizados no Brasil**. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil. 2013.

ZANETTI, G. M. et al. Construction and Building Materials: **Evaluation of potential gaseous emissions of asphalt rubber bituminous mixtures**. Proposal of a new laboratory test procedure. Volume 113. Elsevier:

Itália. 2016. Pag. 870-879. Disponível em:  
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816304019>>. Acesso em: 13/06/2020.