



CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO SUPERIOR EM ENGENHARIA CIVIL

CAMILA QUEVEDO SOBROSA

**CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE COM LIGANTE ASFALTO-  
BORRACHA: MATERIAIS E PROCESSOS PRODUTIVOS UTILIZADOS NO  
BRASIL NOS ÚLTIMOS CINCO ANOS**

FLORIANÓPOLIS  
2020

CAMILA QUEVEDO SOBROSA

**CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE COM LIGANTE ASFALTO-  
BORRACHA: MATERIAIS E PROCESSOS PRODUTIVOS UTILIZADOS NO  
BRASIL NOS ÚLTIMOS CINCO ANOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil.

Professor Orientador: Fábio Krueger da Silva.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Sobrosa, Camila Quevedo

**Concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto  
borracha: materiais e processos produtivos utilizados  
no Brasil nos últimos cinco anos / Camila Quevedo  
Sobrosa ; orientação de Fábio Krueger da Silva.**

- Florianópolis, SC, 2020.

66 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal  
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado  
em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico  
de Construção Civil.**

Inclui Referências.

1. Pavimentação. 2. CBUQ. 3. Asfalto-borracha. 4.  
Materiais e processos produtivos. I. Krueger da Silva,  
Fábio. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento  
Acadêmico de Construção Civil. III. Título.

CAMILA QUEVEDO SOBROSA

**CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE COM LIGANTE ASFALTO-  
BORRACHA: MATERIAIS E PROCESSOS PRODUTIVOS UTILIZADOS NO  
BRASIL NOS ÚLTIMOS CINCO ANOS**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de engenheira civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 20 de outubro de 2020.

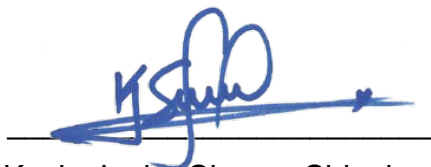
**Banca Examinadora:**



Prof. Fábio Krueger da Silva, Dr.



Profª. Andrea Murillo Betioli, Dra.



Profª. Keyla Junko Chaves Shinohara, Dra.

Dedico este trabalho a minha querida mãe, a mulher mais formidável que já conheci.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Fábio, por me guiar com sabedoria e por sempre estar disposto a contribuir na elaboração deste trabalho.

Agradeço as professoras da banca, que doaram parte do seu tempo para avaliar esta pesquisa. Também à coordenadora do curso, Maurília, que sempre esteve disposta a auxiliar os alunos nas adversidades, com seu jeito doce e meigo.

Sou imensamente grata a minha mãe Lenara Maria, que sempre me incentivou a estudar, me apoiou, prezou pela qualidade dos meus estudos, mesmo quando os recursos eram escassos, enxugou as minhas lágrimas quando as situações eram difíceis e nunca me deixou desistir dos meus sonhos. Mãe, esse diploma também é seu!

Ao meu namorado Pedro, por todo o carinho que tem me dado, pelos conselhos, por ter sido sempre paciente nos meus momentos de angústia, compreensivo, amoroso e por ter visto filmes bobos comigo quando precisei descontraír, você é muito importante na minha vida.

Ao meu irmão de coração Rafael por sempre estar disposto a me ajudar, me aconselhar, incentivar e por ter sido um exemplo para mim.

A minha grande amiga Jaqueline, minha primeira e inesquecível dupla da graduação, uma amiga que guardarei para o resto da vida, obrigada pelos ótimos momentos de descontração e alegria que passamos juntas.

Aos meus queridos colegas Andreza, Fernanda, Heron, Murilo e Rebeca, que fizeram a engenharia ficar mais leve e descontraída.

Por fim, mas não com menor importância, agradeço a Deus, por fortalecer a minha fé e me manter firme em minha jornada, mesmo diante de todo e qualquer percalço.

## RESUMO

Diante da importância do modal rodoviário, da pavimentação no país e da necessidade de alternativas para a destinação de pneus inservíveis que impactam o meio ambiente, este estudo trata-se de um levantamento bibliográfico dos materiais e processos produtivos empregados no concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) com ligante asfalto-borracha no Brasil nos últimos 5 anos. Para isso, buscou-se em artigos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações e teses os teores e tipos de ligante, teores de borracha, tipos de processos produtivos e tipos de granulometria utilizados, desde o ano de 2015.

Realizou-se também um levantamento do custo de usinagem do material por meio do Sistema de Custos Referenciais de Obras do DNIT. Concluiu-se que o CAP 50/70, as curvas granulométricas contínuas e o processo de produção via úmida são as características mais utilizadas nas misturas betuminosas com asfalto-borracha nos últimos 5 anos no Brasil. Também se constatou que o custo de usinagem do concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha no estado de SC teve uma variação de quase 18% de 2017 a 2020.

Palavras-chave: Pavimentação. CBUQ. Asfalto-borracha. Materiais e processos produtivos.

## **ABSTRACT**

*Given the importance of the road modal, paving in the country and the necessity for alternatives for the disposal of waste tires that impact the environment, this study is a bibliographic survey of the materials and productive processes used in compacting hot mix asphalt pavements (CBUQ) with asphalt-rubber binder in Brazil in the last 5 years. For this, articles, undergraduate final works, dissertations and theses were searched for the contents and types of binder, rubber contents, types of production processes and types of granulometry used since 2015.*

*A survey of the cost of machining the material was also sought out through the DNIT's Referential Cost System. It was concluded that CAP 50-70, the continuous granulometric curves and the wet process of production are the characteristics most used in bituminous mixtures with asphalt-rubber in the last 5 years in Brazil. It was also found that the cost of compacting hot mix asphalt pavements with asphalt-rubber binder in the state of SC had a variation of almost 18% from 2017 to 2020.*

*Keywords: Paving. CBUQ. Asphalt-rubber. Materials and productive processes.*

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Dissipação da tensão nos pavimentos flexíveis e rígidos .....  | 5  |
| Figura 2 - Corte transversal do pavimento flexível .....  | 7  |
| Figura 3 - Tensões solicitantes no pavimento .....  | 8  |
| Figura 4 - Lançamento e compactação de CBUQ.....  | 16 |
| Figura 5 - Tanque vertical de estocagem de asfalto-borracha .....   | 18 |
| Figura 6 - Processo úmido <i>Terminal Blending</i> de produção do AMB.....  | 21 |
| Figura 7 - Equipamento do ensaio de recuperação elástica por torção .....   | 23 |
| Figura 8 - Ductilômetro.....  | 24 |
| Figura 9 - Cuba e esfera do ensaio de resiliência dos ligantes modificados .....  | 25 |
| Figura 10 - Fluxograma de métodos .....   | 27 |
| Figura 11 - Gráfico dos tipos de pesquisa com ensaios sobre concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha nos últimos 5 anos .....                      | 32 |
| Figura 12 - Tipos de granulometrias utilizadas na produção de concreto asfáltico com asfalto-borracha utilizados nas pesquisas experimentais nos últimos 5 anos             | 33 |
| Figura 13 - Origem mineral dos agregados utilizados nas pesquisas selecionadas .....  | 34 |
| Figura 14 - Origem mineral dos agregados utilizados nas pesquisas selecionadas de acordo com a região do Brasil.....  | 34 |
| Figura 15 - Gráfico do tipo de ligante utilizado nas pesquisas experimentais com concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha nos últimos 5 anos ..... | 35 |
| Figura 16 - Adições utilizadas nas pesquisas com concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha desde 2015.....  | 36 |
| Figura 17 - Gráfico dos processos de produção de concreto asfáltico com asfalto-borracha utilizados nas pesquisas experimentais nos últimos 5 anos .....                    | 37 |
| Figura 18 - Gráfico dos valores da usinagem por tonelada de concreto asfáltico com borracha faixa C e brita comercial no estado de SC .....                                 | 39 |
| Figura 19 - Gráfico dos valores da usinagem por tonelada de concreto asfáltico <i>gap-graded</i> com borracha e brita comercial no estado de SC .....                       | 39 |
| Figura 20 - Gráfico dos valores da usinagem por tonelada de concreto asfáltico convencional com brita comercial no estado de SC.....  | 40 |

Figura 21 - Gráfico dos valores, no estado de SC, da usinagem por tonelada de concreto asfáltico convencional, concreto asfáltico com borracha e faixa C e concreto asfáltico com borracha e granulometria *gap-graded*..... 41

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Classificação da situação dos pavimentos das rodovias federais brasileiras pesquisadas pela CNT..... | 6  |
| Tabela 2 - Legenda do Quadro 6 .....  | 29 |
| Tabela 3 - Número de pesquisas selecionadas que utilizaram cada ensaio nas misturas asfálticas.....             | 38 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 - Classificação por penetração dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) .....  | 11 |
| Quadro 2 - Classificação dos cimentos asfálticos modificados por borracha .....  | 12 |
| Quadro 3 - Especificação das faixas granulométricas do DNIT .....  | 14 |
| Quadro 4 - Especificações mecânicas do CBUQ .....  | 17 |
| Quadro 5 – Especificações mecânicas do concreto asfáltico modificado por borracha .....  | 19 |
| Quadro 6 (a) - Materiais e processos produtivos das pesquisas experimentais que utilizaram concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha no Brasil desde 2015..... | 30 |
| Quadro 6 (b) – Materiais e processos produtivos das pesquisas experimentais que utilizaram concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha no Brasil desde 2015..... | 31 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |   |
|-------|---|
| AMB   | Asfalto Modificado por Borracha                                       |
| AMP   | Asfalto Modificado por Polímeros                                      |
| CAP   | Cimento Asfáltico de Petróleo   |
| CBR   | <i>California Bearing Ratio</i> ou ISC – Índice de Suporte Califórnia |
| CBUQ  | Concreto Betuminoso Usinado à Quente                                  |
| CPR   | Centro de Pesquisas Rodoviárias                                       |
| CNT   | Confederação Nacional de Transportes                                  |
| DNER  | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem                          |
| DNIT  | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes                |
| EUA   | Estados Unidos da América   |
| IBGE  | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                       |
| SICRO | Sistema de Custos Referenciais de Obras                               |
| SMA   | <i>Stone Matrix Asphalt</i> - Mistura de granulometria descontínua    |

## SUMÁRIO

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                      | <b>1</b>  |
| <b>1.1</b> | <b>Justificativa</b> .....                                   | <b>2</b>  |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivos</b> .....                                       | <b>3</b>  |
| 1.2.1      | Objetivo geral .....   | 3         |
| 1.2.2      | Objetivos específicos.....                                   | 3         |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....                           | <b>4</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>Pavimento</b> .....                                       | <b>4</b>  |
| 2.1.1      | Pavimentação no Brasil .....                                 | 5         |
| <b>2.2</b> | <b>Pavimento Flexível</b> .....                              | <b>6</b>  |
| 2.2.1      | Mecânica do pavimento flexível.....                          | 8         |
| <b>2.3</b> | <b>Ligantes</b> .....  | <b>9</b>  |
| <b>2.4</b> | <b>Agregados</b> .....                                       | <b>13</b> |
| <b>2.5</b> | <b>CBUQ</b> .....  | <b>16</b> |
| <b>2.6</b> | <b>CBUQ Com Ligante Asfalto-Borracha</b> .....               | <b>17</b> |
| 2.6.1      | Breve histórico .....  | 20        |
| 2.6.2      | Processos de produção do AMB .....                           | 20        |
| 2.6.2.1    | <i>Processo úmido</i> .....                                  | 20        |
| 2.6.2.2    | <i>Processo seco</i> .....                                   | 21        |
| 2.6.3      | Ensaio específicos .....                                     | 22        |
| 2.6.3.1    | <i>Ensaio de estabilidade a estocagem</i> .....              | 22        |
| 2.6.3.2    | <i>Ensaio de recuperação elástica por torção</i> .....       | 23        |
| 2.6.3.3    | <i>Ensaio de recuperação elástica por ductilômetro</i> ..... | 24        |
| 2.6.3.4    | <i>Ensaio de resiliência</i> .....                           | 24        |
| 2.6.4      | Vantagens do asfalto modificado por borracha .....           | 25        |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA DA PESQUISA</b> .....                         | <b>26</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Materiais</b> .....                                       | <b>26</b> |

|            |                                       |           |
|------------|---------------------------------------|-----------|
| <b>3.2</b> | <b>Métodos</b> .....                  | <b>26</b> |
| 3.2.1      | Pesquisa documental .....             | 27        |
| 3.2.2      | Levantamento de custo .....           | 28        |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS</b> .....               | <b>29</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Pesquisa documental</b> .....      | <b>29</b> |
| 4.1.1      | Materiais utilizados .....            | 32        |
| 4.1.2      | Processos produtivos utilizados ..... | 36        |
| <b>4.2</b> | <b>Levantamento de custo</b> .....    | <b>38</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....     | <b>42</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS</b> .....              | <b>44</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Pesquisas da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2018) apontam que mais de 61% do transporte de cargas e mais de 95% do transporte de passageiros no Brasil são realizados por rodovias. Porém, levando em consideração a malha rodoviária total do país, apenas 12,4% das rodovias são pavimentadas, o que representa 213.453 km, enquanto 1.507.248 km (87,6%) ainda não possuem pavimentação. Tais dados provocam impactos na segurança e conforto dos passageiros, maiores consumos de combustíveis, desgaste nos veículos, aumento do tempo de deslocamento e, conseqüentemente, oneração no custo dos transportes.

Devido às propriedades como impermeabilidade, grande poder de aglutinação entre os agregados, fácil manuseio e aplicação em diversas faixas de temperaturas e a facilidade de manutenção, o pavimento asfáltico é o mais utilizado em diversos países, inclusive no Brasil, onde mais de 95% das rodovias pavimentadas possuem este material (ARAÚJO, 2016).

Entretanto, uma das desvantagens deste tipo de pavimento são as patologias, dentre as quais se destacam as trincas por fadiga e o acúmulo de deformações permanentes, como por exemplo, as trilhas de roda. O uso do ligante asfalto-borracha possui diversas vantagens em relação ao cimento asfáltico de petróleo convencional, como maior viscosidade, elasticidade, menor sensibilidade às variações de temperatura e aos raios UV, reflexão de trincas e envelhecimento mais lentos, diminui os ruídos provocados pelo tráfego e concede ao pavimento maior poder impermeabilizante e maior atrito pneu pavimento, o que minimiza o risco de acidentes (MENDES e NUNES, 2009).

Além das vantagens mecânicas do asfalto-borracha, existe também o benefício ambiental trazido pela reciclagem dos pneus. A criação da resolução do CONAMA nº416 de 2009, que regulamentou a destinação adequada aos pneus sem condições de uso e chamou atenção para o descarte deste material, que não é biodegradável, possui grande volume e colabora para a proliferação de vetores transmissores de doenças. Mas este ainda se trata de um problema ambiental, que conforme pesquisa de Silveira (2016) em 2015 foram descartados 45,7 milhões de pneus no Brasil.

Vista a relevância da pavimentação asfáltica no modal rodoviário brasileiro, o problema ambiental ocasionado pelos pneus descartados no meio ambiente e as vantagens do ligante asfalto-borracha, é notada a importância dos estudos sobre este assunto. Logo, esta pesquisa visa realizar um levantamento dos estudos laboratoriais, feitos no Brasil, com misturas asfálticas com asfalto-borracha, a fim de auxiliar na escolha de materiais e métodos em pesquisas e no emprego futuro deste material.

### **1.1 Justificativa**

Conforme a CNT (2018), a principal deficiência das rodovias é o desgaste dos pavimentos, o qual ascendeu 36% nas rodovias federais do ano de 2004 a 2016. As principais patologias que acometem essas estruturas são as trincas por fadiga, as quais aumentam com o envelhecimento do pavimento, gerado pelo aumento da dureza e diminuição da ductilidade do ligante (ODA, 2000). Logo, pesquisas sobre diferentes tipos de ligantes são fundamentais para se obter uma melhora nas condições das rodovias brasileiras.

Nesse contexto surge o asfalto-borracha, que consiste na adição do pó de borracha de pneus na mistura betuminosa, trazendo diversos benefícios ao seu comportamento mecânico, como maior adesividade aos agregados, resistência a trincas, poder impermeabilizante, ponto de amolecimento, o que reduz a formação das trilhas de roda, maior resistência às variações de temperatura e durabilidade. Além disso, uma das grandes vantagens deste tipo de CBUQ é a sustentabilidade, pois na produção de um quilômetro desse material aproximadamente mil pneus inservíveis são utilizados de uma maneira ambientalmente correta (OLIVEIRA et al., 2009).

Diante disso, é perceptível a necessidade da realização de estudos sobre o asfalto-borracha, porém, como saber quais materiais e métodos utilizar, quais componentes os pesquisadores estão utilizando atualmente nas misturas betuminosas deste tipo, qual o custo deste material? Pensando nisso, a presente pesquisa busca acrescentar informações nesta área, a fim de contribuir para análises futuras no emprego do asfalto-borracha.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos geral e específicos da pesquisa encontram-se nos subitens a seguir.

### 1.2.1 Objetivo geral

Realizar uma pesquisa bibliográfica dos materiais, processos e ensaios utilizados na produção de concreto betuminoso usinado a quente com uso de ligante asfalto-borracha, em trabalhos laboratoriais, nos últimos 5 anos no Brasil e fazer um levantamento de custo do AMB (Asfalto Modificado por Borracha) na região de Santa Catarina.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

1. Fazer o levantamento bibliográfico dos materiais e processos produtivos utilizados na produção de AMB, em pesquisas laboratoriais, nos últimos 5 anos no Brasil;
2. Identificar os ensaios em misturas asfálticas utilizados na confecção de CBUQ com asfalto-borracha, em pesquisas laboratoriais, nos últimos 5 anos no Brasil;
3. Avaliar o custo da usinagem do concreto asfáltico com borracha no Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do DNIT no estado de Santa Catarina.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Pavimento

Pavimento é a estrutura constituinte de camadas finitas, presente em obras da construção civil como ruas, rodovias, aeroportos, entre outras. Encontra-se sobre o terreno de fundação, chamado de subleito, e tem a função de fornecer ao usuário segurança e conforto, obtendo a máxima qualidade com o menor custo (MARQUES, 2012).

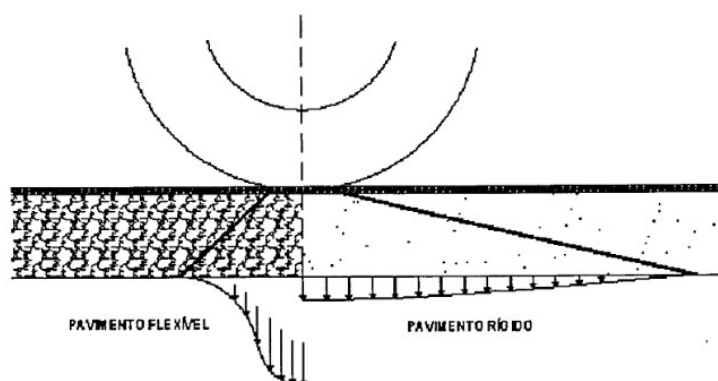
Segundo Bernucci et al. (2006), pavimento é a estrutura composta por diferentes camadas, localizada acima da superfície obtida pelos serviços de terraplenagem, responsável por resistir aos esforços gerados pelo tráfego de veículos, proporcionando conforto e segurança aos usuários.

Por questões econômicas e de disponibilidade de matéria-prima, o pavimento é constituído por camadas de diferentes materiais e resistências, as quais devem resistir aos esforços solicitantes na via. Por isso, deve-se conhecer a resistência de cada camada desta superestrutura por meio de ensaios laboratoriais e realizar cálculos para o seu dimensionamento (DNIT, 2006).

Os pavimentos podem ser classificados como flexíveis, semirrígidos e rígidos, sendo os chamados flexíveis aqueles em que os esforços se distribuem de forma uniforme pelas camadas, ou seja, todas as camadas sofrem deformação elástica vinda do esforço aplicado. Já os rígidos são aqueles nos quais a camada superior, devido a sua elevada rigidez, sofre a maior parte dos esforços provenientes do carregamento. Por fim, os semirrígidos são aqueles que possuem uma base cimentada, como o solo cimento, por exemplo e uma camada flexível acima (DNIT, 2006).

A Figura 1 ilustra a diferença entre a dissipação da tensão em um pavimento flexível e um pavimento rígido, onde o primeiro permite a passagem das solicitações do revestimento asfáltico, camada de baixa rigidez, para as demais camadas do pavimento de forma constante, enquanto no segundo, a camada de revestimento de concreto absorve a maior parte da tensão, devido a sua elevada rigidez.

**Figura 1 - Dissipação da tensão nos pavimentos flexíveis e rígidos**



Fonte: Pinto (2003).

### 2.1.1 Pavimentação no Brasil

Tratando-se da história da pavimentação no nosso país, uma das primeiras estradas foi a Estrada do Mar, que começou a ser construída em 1560 e foi recuperada em 1789. Um trecho dessa rodovia foi pavimentado com lajes de granito e posteriormente, em 1922 outro trecho foi pavimentado com concreto. No ano de 1841 foi criada a Estrada Normal da Serra da Estrela, por um engenheiro alemão contratado por D. Pedro II, que ligava as cidades de Porto de Estrela (RJ) a Petrópolis (RJ). Até o ano de 1860 o revestimento mais utilizado nas rodovias eram pedras vindas de Portugal, então surgiu a estrada que ligava Petrópolis (RJ) a Juiz de Fora (MG), a primeira a utilizar macadame no Brasil, que atualmente está modificada e faz parte da BR-040 (BERNUCCI et al., 2006).

Posteriormente houve diversos fatores que influenciaram na evolução das estradas no Brasil, como o advento dos automóveis no país, que teve como consequências o 1º Congresso Nacional de Estradas e Rodagem (1916) e a criação de rodovias como a Rio-São Paulo (1928), Rio-Petrópolis (1928) e Presidente Dutra (1949). Outro advento importante foi a Segunda Guerra Mundial, no qual engenheiros brasileiros trouxeram técnicas novas, como o conhecido o ensaio CBR (Índice Suporte Califórnia), que foi de grande importância para o dimensionamento dos pavimentos. Em 1937 foi criado o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e em 1953 a Petrobrás, que trouxe uma fábrica de asfaltos e tecnologias rodoviárias antes desconhecidas no país. Com a implantação da indústria automobilística (1956), o presidente Juscelino Kubitschek

deu grande incentivo às rodovias, com a criação do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (1958), da Associação Brasileira de Pavimentação (1959) e da cidade de Brasília (1960). Depois deste período houveram outras rodovias importantes, como a Rodovia Transamazônica e a Ponte Rio-Niterói (BERNUCCI et al., 2006).

Atualmente o Brasil é um país com rodovias em abundância, com 107.161 km de rodovias federais. Porém, existem graves problemas como a falta de conservação, sinalização, a geometria deficiente das vias e, principalmente, as patologias que ocorrem nos revestimentos. Dentre os 107.161 km de rodovias federais avaliados, 54.635 km (50,9%) estavam com problemas no pavimento, como mostra a Tabela 1 (CNT, 2018).

**Tabela 1 - Classificação da situação dos pavimentos das rodovias federais brasileiras pesquisadas pela CNT**

| Pavimento    | Extensão Total |              |
|--------------|----------------|--------------|
|              | Km             | %            |
| Ótimo        | 45.211         | 42,3         |
| Bom          | 7.315          | 6,8          |
| Regular      | 39.664         | 37,0         |
| Ruim         | 10.205         | 9,5          |
| Péssimo      | 4.766          | 4,4          |
| <b>TOTAL</b> | <b>107.161</b> | <b>100,0</b> |

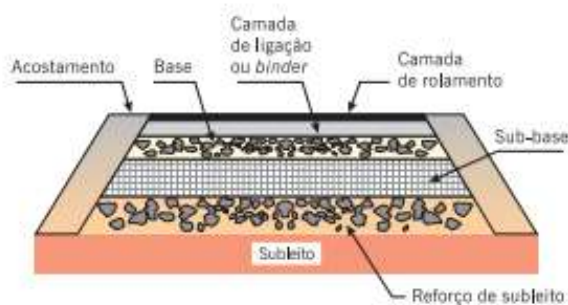
Fonte: CNT (2018).

Como o enfoque desta pesquisa é o concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha, abordar-se-á somente os pavimentos flexíveis.

## 2.2 Pavimento Flexível

O pavimento flexível é composto pelas seguintes camadas: revestimento ou camada de rolamento, camada de ligação ou *binder*, base, sub-base, reforço do subleito e subleito, conforme a Figura 2.

**Figura 2 - Corte transversal do pavimento flexível**



Fonte: Bernucci et al. (2006).

Segundo Marques (2012) e DNIT (2006), as camadas típicas dos pavimentos flexíveis são:

- a) Subleito: material resultante dos serviços de terraplenagem, no qual será apoiado o pavimento. A resistência desse material deve ser avaliada até a profundidade que deverá resistir aos esforços de tensão, geralmente de 0,60 m a 1,50 m. Esse material deverá possuir CBR (Índice Suporte Califórnia) mínimo de 2%, caso contrário, deverá ser substituído por uma camada de pelo menos 1 m de material mais resistente. Caso o CBR do subleito seja igual ou superior a 20%, pode-se utilizá-lo como sub-base;
- b) Reforço do Subleito: necessário quando a camada de subleito possui baixa qualidade, tendo como funções melhorar sua capacidade resistiva e regularizar a espessura da camada de sub-base;
- c) Sub-base: é utilizada a fim de regularizar a espessura e complementar a camada de base. Esta camada deve ser composta por solo de CBR mínimo 20%;
- d) Base: camada responsável por resistir e distribuir através do pavimento até o subleito as tensões provenientes do carregamento, sendo a camada (abaixo do revestimento) de maior resistência e qualidade, com CBR mínimo de 80%;
- e) Camada de ligação: posicionada imediatamente abaixo da camada de revestimento, possui uma mistura asfáltica com características diferentes, como por exemplo maior porcentagem de vazios que a camada de rolamento;

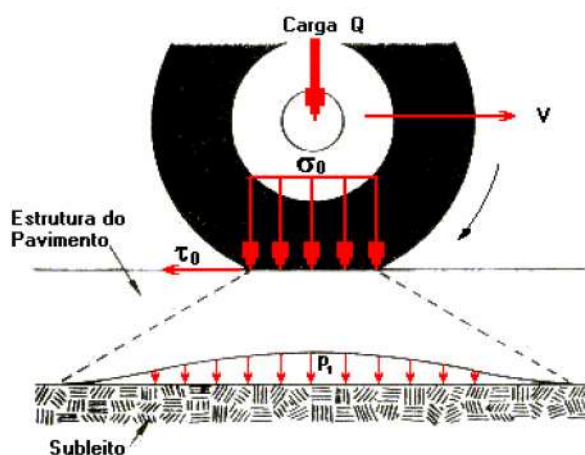
f) Camada de rolamento: camada mais superficial, destinada a resistir aos esforços do tráfego de veículos e a proporcionar maior conforto e segurança aos usuários da via. Deve possuir grande impermeabilidade e resistir ao desgaste provocado pela utilização do pavimento;

### 2.2.1 Mecânica do pavimento flexível

O revestimento asfáltico é a camada que resiste diretamente às ações do tráfego e as transmite para as demais camadas do pavimento, essa resistência à tensão está diretamente associada ao seu trincamento por fadiga. O objetivo da mecânica dos pavimentos é limitar as deformações na estrutura do pavimento por meio de combinações de diferentes materiais e espessuras, sendo as camadas de base, sub-base e reforço do subleito de suma importância estrutural nos pavimentos flexíveis (BERNUCCI et al., 2006).

Os revestimentos asfálticos sofrem tensões horizontais e verticais. Conforme ilustra a Figura 3, os veículos com suas cargas ( $Q$ ) e suas velocidades ( $V$ ) comprimem o pavimento, causando uma tensão vertical ( $\sigma_0$ ) que exige resistência à compressão, mas, também, a passagem dos pneus causa uma tensão horizontal de cisalhamento ( $\tau_0$ ), a qual exige dessa superfície coesão (MARQUES, 2012).

**Figura 3 - Tensões solicitantes no pavimento**



Fonte: Santana (1993) apud Raimundo (2015).

O intuito do estudo da mecânica dos pavimentos é encontrar um arranjo que possibilite a diluição da tensão vertical nas demais camadas, a fim de que ele receba o mínimo possível dessa tensão superficial (P1).

São diversos os fatores que contribuem para o desgaste dos pavimentos, entre eles está o clima, que acelera a deterioração do pavimento, seja pela alta incidência de chuvas, seja pelo calor excessivo, o qual eleva demasiadamente a temperatura do pavimento, o que reduz a viscosidade do ligante e assim a resistência da estrutura. Com o passar do tempo e a atuação das intempéries climáticas, ocorre o envelhecimento do pavimento, o qual se caracteriza pelo aumento da dureza e diminuição da ductilidade do ligante. Estando esta estrutura constantemente solicitada pela carga do tráfego, ocorrem as trincas por fadiga, que evoluem com a ocorrência de chuvas, pois a penetração da água no pavimento reduz sua resistência. Temperaturas muito baixas também são nocivas aos pavimentos, pois podem provocar trincamento no revestimento asfáltico por retração e levam ainda ao seu enrijecimento que, se muito delgado, e construído sobre materiais muito deformáveis, fica mais suscetível ao trincamento por fadiga (BERNUCCI et al., 2006).

### **2.3 Ligantes**

O ligante asfáltico ou Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é um material betuminoso resultante da destilação do petróleo utilizado em pavimentação. Tem como características ser um adesivo termoviscoelástico, impermeável, de estado físico semissólido à baixas temperaturas e pouco reativo. Porém, mesmo tendo baixa reatividade, não significa que este material não sofra um processo de envelhecimento por oxidação em contato com água e ar. Como é um material termoviscoelástico, que ao deformar-se apresenta comportamento simultaneamente viscoso e elástico, é suscetível à velocidade, ao tempo, à intensidade de carregamento e à temperatura. Outra propriedade importante do CAP é a alta solubilidade em benzeno, tricloroetileno ou em bissulfeto de carbono (BERNUCCI et al., 2006).

A obtenção do betume dá-se a partir do processamento do petróleo bruto em refinarias, o qual consiste em um conjunto de processos de

transformação dos materiais que constituem o petróleo. O tipo mais comum de refino petrolífero é a destilação direta, que precisa de apenas um ou dois estágios de destilação, sendo eles a atmosférica e a vácuo (BERNUCCI et al., 2006).

O transporte e o armazenamento destes materiais é algo bastante delicado, devido ao fato de o CAP ser um produto termossensível, que tem suas propriedades dependentes da temperatura na qual se encontra. Por este motivo, o material deve ser mantido em elevada temperatura, a qual depende do tipo de ligante. Portanto, deve haver um controle constante no manuseio do produto, desde o seu produtor, até os distribuidores e consumidores, buscando viabilizar seu escoamento de um local para outro sem que haja riscos ou que se perca a qualidade do produto (DECONCIC, 2009). Segundo a norma DNIT 031/2006 - ES, o armazenamento dos ligantes deve ser feito em depósitos com sensores de temperatura, capazes de aquecê-los, mas também evitando qualquer superaquecimento. Deve haver um sistema de circulação do ligante e uma capacidade suficiente para no mínimo três dias de serviço. Outro adendo relevante é impedir o contato do ligante com a água, o qual causaria espumação e aumento considerável do volume.

Até 2005, os CAPs eram classificados pela viscosidade nomeados CAP 7, CAP 20 e CAP 40, de acordo com a norma DNER-EM 204 (1995). Atualmente existe a classificação grau PG (grau de desempenho), regida pela norma ASTM 6373/2016, na qual os ligantes são classificados em temperaturas máximas e mínimas em que apresentam determinadas propriedades e escolhidos de acordo com o clima do local de projeto. São exemplos o PG 64-22, o PG 70-22 e o PG 76-22, onde o primeiro número é a temperatura mais alta durante os sete dias consecutivos mais quentes do ano, a uma profundidade de 20mm de revestimento e o segundo número é a temperatura mínima no mesmo ponto, no dia mais frio do ano (BERNUCCI et al., 2006).

Porém, a classificação mais usual no Brasil é a por penetração, exposta no Quadro 1, de acordo com a norma DNIT 095/2006.

**Quadro 1 - Classificação por penetração dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP)**

| CARACTERÍSTICAS                                     | UNIDADES | LIMITES           |                   |                   |                   | MÉTODOS   |        |           |
|---|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------|--------|-----------|
|   |          | CAP<br>30 / 45    | CAP<br>50 / 70    | CAP<br>85 / 100   | CAP<br>150 / 200  | ABNT      | ASTM   | DNER      |
| Penetração (100 g, 5s, 25°C)                        | 0,1mm    | 30 - 45           | 50 - 70           | 85 - 100          | 150 - 200         | NBR 6576  | D 5    | ME 003/99 |
|   | °C       | 52                | 46                | 43                | 37                | NBR 6560  | D 36   |           |
| Viscosidade Saybolt Furol                           | s        |                   |                   |                   |                   | NBR 14950 | E 102  | ME 004/94 |
| a 135 °C, mín                                       |          | 192               | 141               | 110               | 80                |           |        |           |
| a 150 °C, mín                                       |          | 90                | 50                | 43                | 36                |           |        |           |
| a 177 °C  |          | 40 - 150          | 30 - 150          | 15 - 60           | 15 - 60           |           |        |           |
| OU  |          |                   |                   |                   |                   |           |        |           |
| Viscosidade Brookfield                              | cP       |                   |                   |                   |                   | NBR 15184 | D 4402 |           |
| a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín                         |          | 374               | 274               | 214               | 155               |           |        |           |
| a 150 °C, SP<br>21, mín.                            |          | 203               | 112               | 97                | 81                |           |        |           |
| a 177 °C, SP 21                                     |          | 76 - 285          | 57 - 285          | 28 - 114          | 28 - 114          |           |        |           |
| Índice de susceptibilidade<br>térmica (1)           |          | (1,5) a<br>(+0,7) | (1,5) a<br>(+0,7) | (1,5) a<br>(+0,7) | (1,5) a<br>(+0,7) |           |        |           |
| Ponto de fulgor mín                                 | °C       | 235               | 235               | 235               | 235               | NBR 11341 | D 92   | ME 149/94 |
| Solubilidade em<br>tricloroetileno, mín             | % massa  | 99,5              | 99,5              | 99,5              | 99,5              | NBR 14855 | D 2042 | ME 153/94 |
| Ductilidade a 25° C, mín                            | cm       | 60                | 60                | 100               | 100               | NBR 6293  | D 113  | ME 163/98 |
| Efeito do calor e do ar<br>(RTFOT) a 163 °C, 85 min |          |                   |                   |                   |                   |           | D 2872 |           |
| Variação em massa, máx (2)                          | % massa  | 0,5               | 0,5               | 0,5               | 0,5               |           |        |           |
| Ductilidade a 25° C, mín                            | cm       | 10                | 20                | 50                | 50                | NBR 6293  | D 113  | ME 163/98 |
| Aumento do ponto de<br>amolecimento, máx            | °C       | 8                 | 8                 | 8                 | 8                 | NBR 6560  | D 36   |           |
| Penetração retida, mín (3)                          | %        | 60                | 55                | 55                | 50                | NBR 6576  | D 5    | ME 003/99 |

Fonte: DNIT (2006).

Os tipos de ligante mais usados na pavimentação são o CAP 30-45, mais viscoso, e o CAP 50-70, chamado comumente de CAP convencional. Existem também outros tipos de ligante, como as emulsões asfálticas, os Asfaltos Modificados por Polímeros (AMP) e o Asfalto Modificado por Borracha (AMB), por exemplo. No Quadro 2 encontra-se a classificação do cimento asfáltico modificado por borracha da norma 111/2009 do DNIT, que separa os ligantes modificados por borracha em AB8 e o AB22, classificados por viscosidade, sendo o segundo mais viscoso, com maior teor de pó de borracha.

**Quadro 2 - Classificação dos cimentos asfálticos modificados por borracha**

| Características   | Unid. | Asfalto Borracha |            | Métodos de ensaio |
|---|-------|------------------|------------|-------------------|
|   |       | Tipo AB 8        | Tipo AB 22 |                   |
| Penetração, 100g, 5s, 25°C                                      | 0,1mm | 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, 10 cm, 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    |

Fonte: DNIT (2009).

Segundo a Petrobrás (2019), os ligantes asfálticos devem apresentar os seguintes requisitos de qualidade:

- a) Consistência e dureza: determinada pelo ensaio de penetração, que em conjunto com o ensaio de ponto de amolecimento, é utilizado para determinar a suscetibilidade térmica dos asfaltos betuminosos;
- b) Ductibilidade: capacidade do material asfáltico alongar-se sem romper, quando tracionado;
- c) Termoplasticidade e viscoelasticidade: características que possibilitam o manuseio do asfalto ainda quente na aplicação e o retorno às propriedades viscoelásticas na utilização, depois de resfriado;

d) Suscetibilidade térmica: capacidade de suportar variações de temperatura sem perder a consistência e a ductibilidade, para testar este índice são utilizados os ensaios de penetração e de ponto de amolecimento;

e) Durabilidade: avaliada pelo efeito do calor e do ar no ligante, que vai determinar a perda de penetração, ductibilidade, massa e o aumento no ponto de amolecimento.

## **2.4 Agregados**

O estudo da pavimentação consiste na busca pelos materiais mais adequados para compor cada camada do pavimento, aliando economia e eficácia. Foram demonstradas as características dos ligantes na camada de revestimento do pavimento, entretanto, os agregados são os materiais que compõem, além da camada de revestimento, as demais camadas dos pavimentos e também são de suma importância para a estrutura.

Os agregados são materiais inertes, que podem ser extraídos de rochas, encontrados na natureza, como o pedregulho, os seixos rolados, entre outros, ou podem ser provenientes de uma transformação física e química de um material natural, como a escória e a argila expandida, por exemplo. A escolha dos agregados está diretamente ligada à sua disponibilidade e custo, no entanto, também devem ser levadas em consideração as características mecânicas destes agregados, que terão relação direta com o comportamento do pavimento (RAIMUNDO, 2015).

Os agregados podem ser classificados segundo a natureza, tamanho e distribuição dos grãos. Na classificação quanto à natureza destacam-se os naturais, os artificiais e os reciclados, provenientes da britagem de outros materiais. Já quanto ao tamanho dos grãos tem-se o agregado graúdo, com grãos de diâmetro superior a 4,8 mm, agregado miúdo, com grãos de diâmetro superior a 0,075 mm e inferior a 4,8 mm. Existe também o conceito de tamanho máximo do agregado, que é a menor abertura de malha de peneira através da qual passam 100% das partículas de agregado. A norma que especifica os agregados para concreto no Brasil é a ABNT NBR 7211 de 2005.

Tratando da distribuição de grãos, pode-se ter uma graduação densa, aberta, uniforme ou descontínua. Na graduação densa a curva granulométrica do material é bem graduada e contínua, com quantidade de finos suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores, diferente da graduação aberta, que é graduada e contínua, mas não possui quantidade de finos suficientes, tendo um percentual de vazios superior a 30%. Já um agregado uniforme apresenta uma curva mal graduada, com todas as partículas com diâmetros muito semelhantes. Por fim, a graduação descontínua é aquela que apresenta poucas partículas de tamanhos intermediários, formando um patamar na curva granulométrica (RAIMUNDO, 2015). No Quadro 3 encontram-se as faixas granulométricas especificadas pela norma 112/2009 do DNIT que trata de pavimentos flexíveis.

**Quadro 3 - Especificação das faixas granulométricas do DNIT**

| Peneira de malha quadrada              |               | % em massa, passando                    |  |                                  |                                  |            | Tolerâncias máx |
|--|---------------|---|--|----------------------------------|----------------------------------|------------|-----------------|
|  |               | Faixas Contínuas                        |  |                                  | Faixa Descontínua                | GAP GRADED |                 |
| Série ASTM                             | Abertura (mm) | A                                       | B  | C                                |                                  |            |                 |
| 2"                                     | 50,8          | 100                                     | -  |                                  | -                                | -          |                 |
| 1 ½"                                   | 38,1          | 95 - 100                                | 100  |                                  | -                                | ± 7%       |                 |
| 1"                                     | 25,4          | 75 - 100                                | 95 - 100                                   |                                  | -                                | ± 7%       |                 |
| ¾"                                     | 19,1          | 60 - 90                                 | 80 - 100                                   | 100                              | 100                              | ± 7%       |                 |
| ½"                                     | 12,7          | -                                       | -  | 80 - 100                         | 90 - 100                         | ± 7%       |                 |
| 3/8"                                   | 9,5           | 35 - 65                                 | 45 - 80                                    | 70 - 90                          | 78 - 92                          | ± 7%       |                 |
| N° 4                                   | 4,8           | 25 - 50                                 | 28 - 60                                    | 44 - 72                          | 28 - 42                          | ± 5%       |                 |
| N° 10                                  | 2,0           | 20 - 40                                 | 20 - 45                                    | 22 - 50                          | 14 - 24                          | ± 5%       |                 |
| N° 40                                  | 0,42          | 10 - 30                                 | 10 - 32                                    | 8 - 26                           | 8 - 17                           | ± 5%       |                 |
| N° 80                                  | 0,18          | 5 - 20                                  | 8 - 20                                     | 4 - 16                           | 5 - 11                           | ± 3%       |                 |
| N° 200                                 | 0,075         | 1 - 8                                   | 3 - 8                                      | 2 - 10                           | 2 - 7                            | ± 2%       |                 |
| Asfalto solúvel no CS <sub>2</sub> (%) |               | 4,0 - 7,0<br>Camada de ligação (Binder) | 4,5 - 7,5<br>Camada de ligação e rolamento | 4,5 - 8,0<br>Camada de rolamento | 5,0 - 8,0<br>Camada de rolamento | ± 0,3%     |                 |

Fonte: DNIT (2009).

As misturas contínuas e bem graduadas resultam em um bom intertravamento do esqueleto sólido, resistência elevada, alta densidade e baixo volume de vazios. Esta graduação é normalmente empregada em mistura usinada à quente, porém, existem misturas descontínuas que também apresentam bom desempenho mecânico associados à alta resistência e baixa deformabilidade, como por exemplo, as misturas *Stone Matrix Asphalt* (SMA).

SMA é um tipo de mistura asfáltica que apresenta granulometria descontínua, com agregados graúdos em abundância (entre 70 e 80%), 10% de filler, passante na peneira número 200, e aproximadamente 4% de volume de vazios. Devido a grande quantidade de britas, essa mistura possui alta estabilidade e provoca um elevado consumo de cimento asfáltico, entre 1 a 1,5% maior que as misturas convencionais (NEVES FILHO, 2004).

Contudo, além da distribuição granulométrica dos agregados outras propriedades físicas também devem ser observadas, como:

- a) Dureza e resistência à abrasão;
- b) Durabilidade;
- c) Formato das partículas – forma cúbica e áspera é o mais recomendado;
- d) Densidade específica;
- e) Pureza.

Conforme Soares e Cavalcante ([S.d.]) as características dos agregados têm grande influência sobre o comportamento da mistura, sendo sua granulometria bastante relevante na resistência, permeabilidade, rigidez e estabilidade do pavimento. Outra propriedade bastante relevante é a forma do agregado graúdo, deve-se utilizar agregados mais cúbicos, que possuem melhor atrito interno e adesividade, além do fato dos agregados lamelares terem a tendência de quebrar-se facilmente mediante a ação do tráfego, gerando aberturas na pista de rolamento, as quais são preenchidas por água e causam patologias.

## 2.5 CBUQ

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) é uma mistura composta por agregados e ligante asfáltico, feita em usinas e transportada posteriormente por caminhão para a pista, onde é lançada e compactada, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Lançamento e compactação de CBUQ



Fonte: Paraná (2020).

O CBUQ é uma mistura bastante resistente, desde que selecionados e dosados os materiais adequados. Pode ser feita com o CAP convencional ou com um ligante especial. O teor de ligante é um fator que possui significativa influência sobre o comportamento da mistura. Ensaios de tensão constataram que mesmo um pequeno aumento no teor de ligante gera um considerável aumento da resistência à fadiga da mistura. Todavia, se esse aumento do teor de ligante for exagerado, ocorre uma redução do módulo de rigidez da mistura e possível formação de deformações permanentes. Portanto, deve-se buscar o equilíbrio, o teor ótimo, valor onde ocorre a máxima resistência à fadiga e máxima rigidez da mistura (SANTOS, 2005).

A faixa granulométrica escolhida deve ser aquela cujo diâmetro máximo seja inferior a 2/3 da espessura da camada de revestimento especificada no projeto da rodovia. Sendo a granulometria descrita na faixa A uniforme, utilizada em camadas de ligação, na faixa B uma areia bem graduada, utilizada para camadas de ligação e camadas de rolamento e na faixa C uma areia de granulometria descontínua, a mais utilizada em camadas de rolamento (DNIT 031/2006).

O Quadro 4 mostra as especificações da norma do DNIT 031/2006 para concretos asfálticos.

**Quadro 4 - Especificações mecânicas do CBUQ**

| <b>Características</b>   | <b>Método de ensaio</b> | <b>Camada de Rolamento</b> | <b>Camada de Ligação (Binder)</b> |
|--|-------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Porcentagem de vazios, %   | DNER-ME 043             | 3 a 5                      | 4 a 6                             |
| Relação betume/vazios  | DNER-ME 043             | 75 – 82                    | 65 – 72                           |
| Estabilidade, mínima, (Kgf)<br>(75 golpes)                                       | DNER-ME 043             | 500                        | 500                               |
| Resistência à Tração por<br>Compressão Diametral<br>estática a 25°C, mínima, MPa | DNER-ME 138             | 0,65                       | 0,65                              |

Fonte: DNIT 031/2006.

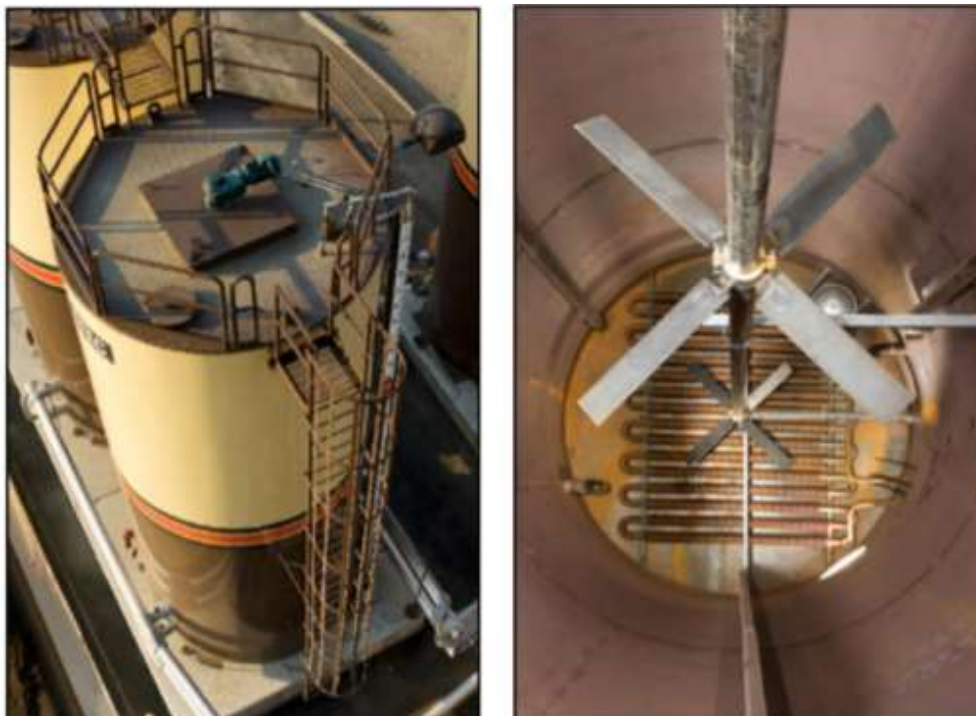
## **2.6 CBUQ Com Ligante Asfalto-Borracha**

Esta mistura asfáltica tem como ligante base o CAP convencional, no qual é adicionado um pó de borracha, proveniente da trituração de pneus que não possuem mais a sua utilidade original e seriam descartados na natureza. Essa borracha em pó é produzida em várias etapas: primeiramente é moída em equipamentos de sistema de rosca sem fim, depois é transportada até um equipamento magnético, a fim de remover as partículas de aço contidas no pneu, passa também por um equipamento de sucção, para remover o tecido e por fim passa novamente pelo equipamento moedor até atingir a granulação desejada (BERTOLLO, 2002).

Um detalhe no processo produtivo do CBUQ com borracha que o diferencia do convencional é a sua usinagem. O ligante e a borracha ficam em caminhões ou tanques separados e posteriormente são colocados em um misturador, onde são misturados e bombeados para um tanque de armazenamento onde a reação ocorre. Esse tanque possui um sistema mecânico com agitação constante que mantém a mistura dispersa e a temperatura entre 160°C e 190°C durante no mínimo 30 minutos. Quando a borracha é adicionada ao ligante, ele deve estar numa temperatura de 175°C a 200°C (ODA, 2000).

A elevada viscosidade do asfalto-borracha resulta numa falta de estabilidade à estocagem, então algumas usinas produtoras deste material possuem tanques verticais com sistemas de agitação, como o da Figura 5. Este tipo de equipamento é fortemente recomendado em outros países para o armazenamento de asfaltos modificados, pois impossibilita a segregação da borracha, ou do polímero do ligante base (CENTRO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, 2017).

**Figura 5 - Tanque vertical de estocagem de asfalto-borracha**



Fonte: Centro de Pesquisas Rodoviárias (2017).

Segundo Specht (2004), as técnicas de execução e manutenção de misturas com AMB são parecidas com as convencionais, todavia, devido a maior viscosidade desse ligante, as bombas e canalizações devem ser maiores e as proteções térmicas reforçadas, quando tratar-se de locais com temperaturas externas baixas.

Oda (2000) também afirma que a execução do AMB é bastante semelhante à mistura convencional e diz que a temperatura de lançamento é usualmente superior a temperatura da mistura, que deve variar entre 145°C e 160°C, e a compactação do material deve ser realizada rapidamente, enquanto ainda quente, pois a viscosidade do asfalto-borracha tende a aumentar rapidamente.

Assim como o CBUQ convencional, a mistura com asfalto modificado por borracha também possui normas que o regem. O Quadro 5 mostra as especificações de resistência à tração, estabilidade, porcentagem de vazios e relação betume-vazio para o concreto asfáltico modificado por borracha de acordo com a norma DNIT 112 (2009).

**Quadro 5 – Especificações mecânicas do concreto asfáltico modificado por borracha**

| Características  | Método de ensaio | Camada de Rolamento | Camada de Rolamento GAP GRADED | Camada de Ligação (Binder) |
|--|------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Porcentagem de vazios, %   | DNER-ME 043      | 3 a 5               | 4 a 6                          | 4 a 6                      |
| Relação betume/vazios  | DNER-ME 043      | 65-78               | 65 - 78                        | 65 – 78                    |
| Estabilidade, mínima, (Kgf) (75 golpes)                                    | DNER-ME 043      | 800                 | 700                            | 700                        |
| Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa | DNER-ME 138      | 0,75                | 0,50                           | 0,65                       |

Fonte: DNIT 112/2009.

### 2.6.1 Breve histórico

A produção do asfalto modificado por borracha é uma técnica relativamente nova no Brasil, mas já é utilizada em outros países há muito tempo (FRAGMAQ, 2016). De acordo com Zatarin et al. (2017) o asfalto-borracha foi criado em 1963 nos EUA por Charles H. Macdonald e desde então vem sendo muito utilizado no exterior. Segundo ele, o produto se mostrou cerca de 40% mais resistente que o asfalto convencional e possui diversas outras vantagens. Já no Brasil os estudos e pesquisas sobre o tema começaram em 1999.

A pesquisa de McDonald tinha o intuito de desenvolver um remendo de pavimento, chamado "*band-aid*", no qual era adicionado 25% de borracha de pneu moído ao ligante asfáltico numa temperatura de 190 °C por 20 minutos. Esse produto foi utilizado também como camada de reforço e como selante para trincas, tendo a sua primeira aplicação na cidade de Phoenix (ODA, 2000).

O uso do asfalto-borracha no país começou após o primeiro congresso mundial sobre o tema em Portugal, no ano de 2000. Sua primeira aplicação foi em 2001, em trechos da BR-116, entre as cidades de Guaíba e de Barra do Ribeiro no Rio Grande do Sul. Outros estados como Rio de Janeiro e São Paulo utilizaram este tipo de concreto asfáltico com pó de borracha (MENDES e NUNES, 2009).

### 2.6.2 Processos de produção do AMB

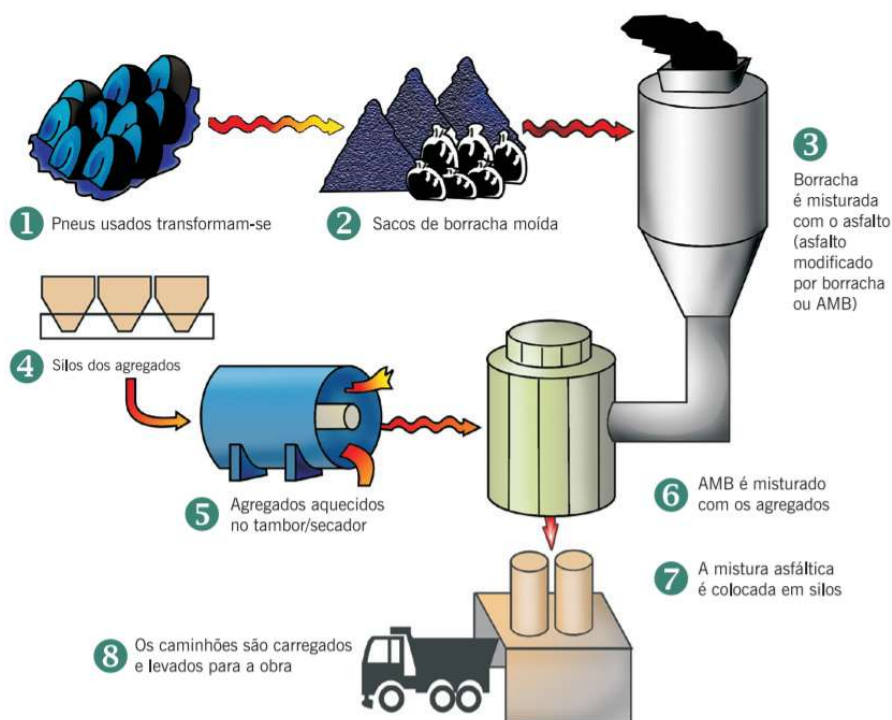
Existem dois métodos de produção do asfalto-borracha, o processo úmido e o processo seco.

#### 2.6.2.1 Processo úmido

No processo úmido a borracha é adicionada no CAP aquecido, em teores de aproximadamente 15 a 20% da massa do ligante. Esse é dividido em dois sistemas de produção, chamados "*continuous blending*" e "*terminal blending*". O *continuous blending* ou sistema não-estocável é produzido na própria obra onde será aplicado e deve ser utilizado imediatamente, por ser um material instável. Já o *terminal blending* ou sistema estocável, mostrado na Figura 6, é usinado em um

terminal adequado com o uso ligantes estáveis e homogêneos e posteriormente transportado até o local de destinação (BERNUCCI et al., 2006).

**Figura 6 - Processo úmido *Terminal Blending* de produção do AMB**



Fonte: Bernucci et al. (2006).

Segundo Oda (2000), neste processo acontece uma interação entre o ligante asfáltico e a borracha moída, responsável por modificar significativamente as propriedades do ligante original, classificada como uma reação. Essa reação depende de vários fatores: a temperatura, que varia de 150°C a 200°C, o tempo, aproximadamente 20 a 120 minutos, e também as características da borracha, como a granulometria, a textura, a proporção ligante/borracha, a compatibilidade entre os materiais, a energia mecânica durante a mistura e o uso ou não de aditivos.

#### 2.6.2.2 Processo seco

No processo seco o pó de pneu moído não é inserido no ligante, mas sim como um aditivo do agregado. Nele os pedaços sólidos de borracha são

adicionados como substituição de no máximo 5% dos agregados (SPECHT, 2004).

As misturas obtidas por este processo são chamadas comumente de agregado-borracha e as que possuem borracha de granulometria mais grossa ( de 0,6mm a 9,5mm) apresentam maior resiliência e excesso de deformação permanente quando comparadas as de granulometria fina, as quais apresentam melhor desempenho quanto à deformação permanente e a flexibilidade, quando comparadas a misturas convencionais (BERTOLLO, 2002).

Segundo Specht (2004), nesse tipo de processo de produção a interação entre o ligante asfáltico e a borracha é muito pequena e propriedades da borracha, como os inibidores de raios ultravioleta e antioxidantes, não são transmitidas para o asfalto, o que é uma desvantagem em relação ao processo úmido.

No processo seco não são necessários equipamentos especiais com temperaturas altas o suficiente para que ocorra a reação ligante-borracha, o que acarreta num custo inferior ao processo úmido. Porém a tecnologia do processo úmido está melhor fundamentada e análises laboratoriais indicam que o desempenho em campo das misturas produzidas por este método pode compensar o maior custo inicial (BERTOLLO, 2002).

### 2.6.3 Ensaios específicos

Assim como nos ligantes e misturas convencionais, são realizados no AMB ensaios como penetração, ponto de amolecimento, viscosidade, ponto de fulgor, estabilidade Marshall, resistência a tração por compressão diametral, entre outros. Entretanto, as misturas com asfalto-borracha possuem ensaios específicos, como a estabilidade a estocagem, a recuperação elástica por torção, recuperação elástica por ductilômetro e resiliência.

#### 2.6.3.1 *Ensaio de estabilidade a estocagem*

Neste ensaio é utilizado um tubo de alumínio contendo asfalto modificado, o qual é colocado em uma estufa por 48 horas a 163°C e depois resfriado a -6,7°C

por 4 horas. Por fim são aquecidas novamente a 163°C e retiradas amostras de ligante do fundo e do topo do tubo e verificados os pontos de amolecimento. A diferença de temperatura dos pontos de amolecimento medidos gera o resultado da estabilidade à estocagem do material (ABNT NBR 15166, 2004).

### 2.6.3.2 *Ensaio de recuperação elástica por torção*

O ensaio de recuperação elástica por torção é mais empregado em outros países, no Brasil o ensaio de recuperação normatizado é o ductilômetro. Conforme o método espanhol padrão para ensaio descrito por Arteris (2014), o ligante deve ser transferido por escoamento para o recipiente de ensaio (Figura 7) e deixado em repouso por uma hora. Posteriormente a amostra é submetida a um banho termostático de 25°C por 90 minutos e torcido a 180° no sentido horário num tempo de 3 a 5 segundos e deixado em repouso por 30 minutos. O resultado do ensaio é a relação entre o ângulo final e o ângulo inicial (180°) da amostra.

**Figura 7 - Equipamento do ensaio de recuperação elástica por torção**

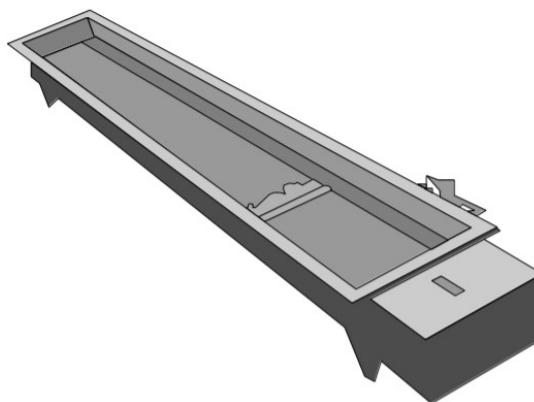


Fonte: Bernucci et al. (2006).

### 2.6.3.3 Ensaio de recuperação elástica por ductilômetro

Este ensaio é realizado de acordo com a norma DNIT 130/2010 e para a sua execução, o cimento asfáltico modificado deve ser aquecido dentro de um béquer em uma estufa a uma temperatura de 150°C a 160°C e despejado em um molde untado com glicerina e dextrina e deixado em temperatura ambiente por 30 a 40 minutos. Então este conjunto é preso nos ganchos de um ductilômetro (Figura 8) e alongado, então a relação entre as medidas inicial e pós tração da amostra representa a recuperação elástica.

**Figura 8 - Ductilômetro**



Fonte: DNIT 130 (2010).

### 2.6.3.4 Ensaio de resiliência

Devido ao fato desse ensaio ser pouco usual no Brasil, não foram encontradas normas nacionais que o regem. Segundo Bernucci et al. (2006), ele mede a capacidade de um ligante retornar ao seu estado original após ser submetido à compressão. Para isso, o ligante é colocado em uma cuba padronizada (Figura 9), colocado em um penetrômetro e pressionado por uma esfera de aço de 75 gramas por 5 segundos e medida a penetração na amostra. Posteriormente o êmbolo é movimentado e são aferidas mais medidas de penetração, por fim a resiliência é a relação entre a medida inicial e a recuperação do ligante.

**Figura 9 - Cuba e esfera do ensaio de resiliência dos ligantes modificados**



Fonte: Bernucci et al. (2006).

#### 2.6.4 Vantagens do asfalto modificado por borracha

O percentual de borracha no betume tem grande influência com a sua viscosidade, ou seja, com o aumento da percentagem de borracha há um aumento da viscosidade do ligante. Além disso, comparando a mistura convencional com a mistura de betume-borracha, percebeu-se no segundo uma maior resistência à fadiga e à deformação permanente, maior capacidade de retardar a propagação de fendas e um melhor comportamento elástico, atribuído à incorporação da borracha no betume (Fontes, 2009).

Segundo a pesquisa da Greca Asfaltos (2006), o uso do AMB possui diversas vantagens quando comparado ao CAP convencional, dentre elas a reflexão de trincas de 5 a 6 vezes mais lenta, melhor condição estrutural, com menor tendência a deformações e maior aderência pneu-pavimento, característica que influencia na aquaplanagem, por exemplo.

Segundo Kalil, Oliveira e Ferreira (2017), a adição dos pneus no CAP é capaz de reduzir significativamente as patologias do pavimento, devido às propriedades físico-químicas da borracha, como a presença de agentes antioxidantes, resistência química a óleos e combustíveis, resistência térmica e aos raios ultravioletas e deformação elástica. Estas características proporcionam ao ligante diversas melhorias que interferem diretamente no envelhecimento do asfalto, aumentando sua durabilidade. De acordo com estes dados, pode-se afirmar que o AMB se torna uma melhor alternativa de ligante asfáltico que o CAP convencional.

### 3 METODOLOGIA DA PESQUISA

A pesquisa tem caráter de consulta documental. A metodologia do estudo foi embasada em coleta e análise de referências bibliográficas que tratam de pesquisas laboratoriais envolvendo o concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha. Por fim, foi realizado um levantamento econômico dos valores praticados no mercado da construção civil de Santa Catarina com base no Sistema de Custos Referenciais do DNIT.

#### 3.1 Materiais

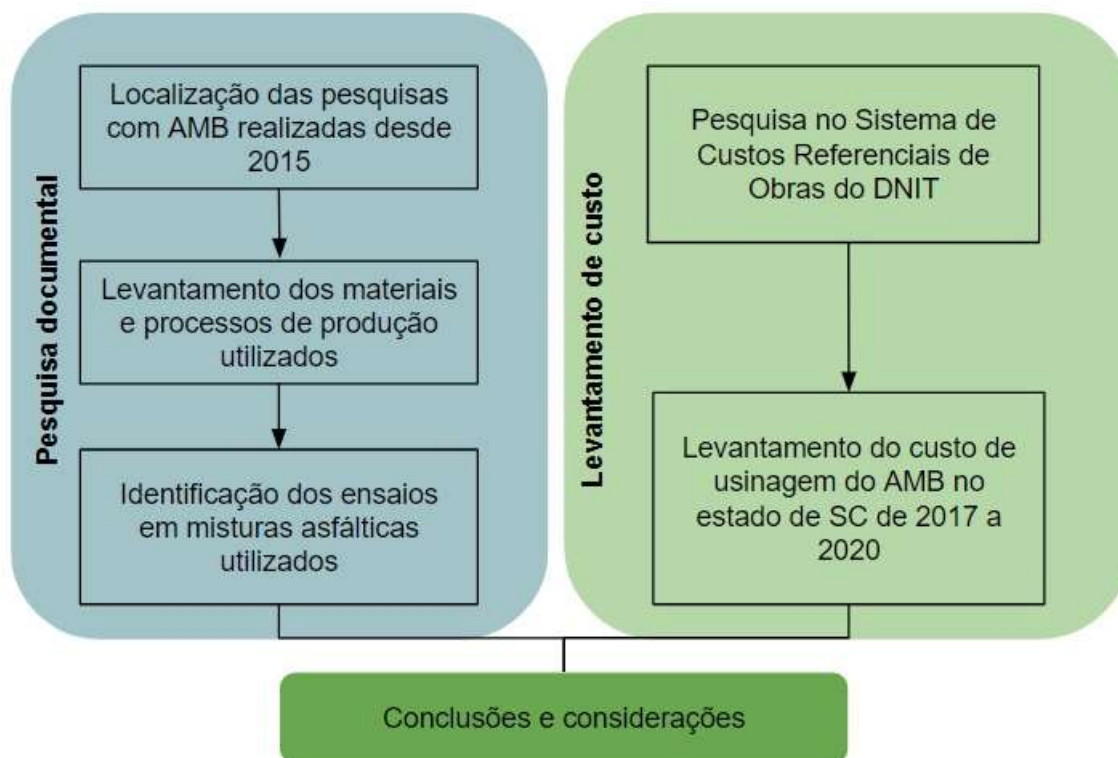
Com o intuito de levantar os estudos envolvendo as misturas betuminosas usinadas a quente com o AMB, foi realizada uma pesquisa bibliográfica nos seguintes *sites* de busca: *Google Scholar*, BDTD (Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações), portal de periódicos da CAPES e plataforma SciELO. Nesta busca foram selecionados os artigos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações e teses, baseados em pesquisas experimentais realizadas no Brasil nos últimos 5 anos.

Buscando um maior entendimento sobre cenário atual do asfalto-borracha no estado de Santa Catarina, foi realizado um levantamento dos custos da usinagem de uma tonelada do CBUQ com o ligante através da consulta ao Sistema de Custos Referenciais de Obras no *site* do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, onde pôde-se coletar os valores do material no estado desde o ano de 2017 – data mais antiga disponível na fonte verificada.

#### 3.2 Métodos

A pesquisa foi dividida em duas etapas: pesquisa documental e levantamento de custo. Visando nortear o direcionamento deste trabalho procurou-se elencar as principais etapas a serem conduzidas. Os métodos empregados encontram-se elencados no fluxograma da Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma de métodos



Fonte: Autora desta pesquisa (2020).

### 3.2.1 Pesquisa documental

As pesquisas encontradas foram analisadas individualmente, buscando-se o conhecimento das propriedades empregadas nas misturas, como, por exemplo: o tipo de granulometria dos agregados, sua origem mineral, as adições, o tipo e o teor de ligante e o teor de borracha. Lembrando que o tipo de ligante foi sempre o asfalto modificado por borracha, porém este pode ser adquirido pronto para uso, como o AB8 e o AB22 ou pode ser utilizado com ligante base, CAP 50/70 ou CAP 30/45 e posteriormente inserido o pó de borracha.

Foram levados em consideração também os processos produtivos das misturas, se via úmida ou via seca, quais as temperaturas empregadas e os ensaios realizados. Estes dados foram compilados em uma única planilha, que será apresentada no capítulo de resultados. Cabe ressaltar que em diversas pesquisas encontradas haviam comparações entre misturas com parâmetros diferentes, então foi exposta somente um tipo de mistura asfáltica de cada

pesquisador, em geral a considerada de melhor desempenho nos ensaios laboratoriais realizados por ele.

### 3.2.2 Levantamento de custo

O levantamento no SICRO gerou dados de custo de usinagem de CBUQ com asfalto-borracha do período de janeiro de 2017 até janeiro de 2020 – planilha mais atual existente na fonte de coleta citada. Além dos valores de usinagem do asfalto-borracha em granulometria contínua e descontínua, foram localizados também custos do asfalto convencional. Esses dados foram organizados em tabelas e gráficos, a fim de realizar uma análise financeira do material estudado e obter uma percepção sobre a variação dos valores no estado de Santa Catarina.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados das análises propostas e suas conclusões preliminares.

### 4.1 Pesquisa documental

Como resultado do levantamento bibliográfico foram encontradas trinta pesquisas experimentais que utilizaram concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha. Seus autores, materiais e processos produtivos que utilizaram encontram-se organizados em ordem crescente de data – do ano de 2015 ao ano de 2020 – no Quadro 6, o qual tem suas legendas presentes na Tabela 2.

**Tabela 2 - Legenda do Quadro 6**

| <b>LEGENDA</b> |                                      |
|----------------|--------------------------------------|
| <b>Símbolo</b> | <b>Significado</b>                   |
| ?              | Dado não informado na pesquisa       |
| E              | Estabilidade                         |
| F              | Fluência                             |
| RT             | Resistência à tração                 |
| MR             | Módulo de resiliência                |
| Gmb            | Massa específica aparente da mistura |

Fonte: Autora desta pesquisa (2020).

Quadro 6 (a) - Materiais e processos produtivos das pesquisas experimentais que utilizaram concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha no Brasil desde 2015

| AUTOR                    | TIPO DE PESQUISA | TÍTULO DA PESQUISA  | MATERIAIS     |                        |                      |   |                 | PROCESSOS       |                            |                      |  |   | RESULTADOS OBTIDOS  |
|--------------------------|------------------|---|---------------|------------------------|----------------------|---|-----------------|-----------------|----------------------------|----------------------|--|---|---|
|                          |                  |   | Granulometria | Faixa granulométrica   | Origem dos agregados | Adição  | Tipo de ligante | Teor de ligante | Teor de borracha           | Processo de produção | Temperaturas empregadas  | Ensaio realizado nas misturas   |   |
| Araújo (2015)            | TCC              | Análise comparativa do asfalto borracha com o asfalto convencional e o asfalto com adição de polímeros  | Continua      | Faixa C do DNIT        | Gnaise               | Não possui                                      | CAP 50/70       | 4,70%           | 18% (da massa do ligante)  | Via úmida            | Ligante: 170°C<br>Agregados: 150°C                                       | Marshall  | F = 3,73 mm E = 1362,27 kgf   |
| Merighi (2015)           | Dissertação      | Estudo do comportamento de misturas asfálticas momas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu                                 | Descontínua   | Gap graded do Caltrans | Granítica            | Não possui                                      | AB8             | 6,00%           | 15% (da massa do ligante)  | Via úmida            | Compactação: 170°C   | Compressão diametral, módulo de resiliência, deformação permanente em trilha de roda, resiliência ao dano por umidade induzida e fadiga | MR = 2992 MPa; RT = 1,16 MPa; F = 3,8 mm; E = 974 kgf   |
| Michels e Arns (2015)    | TCC              | Análise de misturas asfálticas realizadas com ligante asfáltico convencional e com o modificado com borracha aplicando o método Marshall                | Continua      | Faixa C do DNIT        | ?                    | Não possui                                      | AB8             | 6,20%           | 15% (da massa do ligante)  | Via úmida            | Ligante: 175°C<br>Agregados: 185°C<br>Compactação: 175°C                 | Marshall e compressão diametral   | E = 800 kgf ; F = 3,91 mm; RT = 0,6 MPa   |
| Esteves e Silva (2016)   | TCC              | Dosagem superpave de misturas asfálticas com grânulos de borracha pré-ativados  | Descontínua   | Gap-graded             | ?                    | AMBS (Estabilizador de ligante mineral ativado) | CAP 50/70       | 8,30%           | 25% (da massa do ligante)  | Via úmida            | Agregados: 180°C<br>Compactação: 150°C                                   | Dosagem Superpave   | Gmb = 2,335 g/cm³   |
| Marcon (2016)            | Dissertação      | Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímeros SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais | Continua      | Faixa B DNIT           | Basáltica            | 5% de cal hidratada                             | AB8             | 5,40%           | 15% (da massa do ligante)  | Via úmida            | Agregados: 180°C<br>Compactação: 165°C Usinagem: 175°C                   | Marshall, dosagem superpave, dano por umidade induzida, fadiga, e compressão diametral  | RT = 0,65 MPa; F = 3,2 mm; E = 1535 kgf   |
| Santos (2016)            | Dissertação      | Segmentos monitorados de Araranguá: construção e previsão de desempenho do revestimento em camadas singulares e integradas                              | Continua      | Faixa B DNIT           | ?                    | Não possui                                      | AB8             | 5,40%           | 15% (da massa do ligante)  | Via úmida            | Compactação: 155°C a 165°C<br>Usinagem: 170°C a 177°C                    | Marshall, módulo de resiliência, dano por umidade induzida, fadiga e compressão diametral   | RT = 1,3 MPa; MR = 5839 MPa; E = 1836 kgf; F = 0,81mm;  |
| Bastidas (2017)          | Tese             | Asfaltos e misturas modificadas com materiais alternativos  | Continua      | Faixa C DNIT           | Calcária             | Não possui                                      | CAP 50/70       | 7,30%           | 17% (da massa do ligante)  | Via úmida            | Dado variável  | Marshall, módulo de resiliência, compressão diametral, fadiga, creep estático, resistência ao dano por umidade induzida e cântabro      | MR = 3281 MPa; RT = 0,84 MPa; F = 4,0 mm; E = 8443 kgf  |
| Cogo (2017)              | TCC              | Estudo do comportamento de misturas asfálticas densas modificadas com borracha moída  | Continua      | Faixa C DNIT           | Basáltica            | Não possui                                      | CAP 50/70       | 7,10%           | 1% (da massa da mistura)   | Via seca             | Agregados: 156 °C<br>Ligante: 146 °C<br>Compactação: 138 °C              | Marshall, compressão diametral e módulo de resiliência  | MR = 3015 MPa; RT = 0,85 MPa  |
| Curvelo Junior (2017)    | Dissertação      | Incorporação da borracha de pneus inservíveis em misturas asfálticas empregando-se a graduação Bailey para definição da granulometria dos agregados     | Continua      | Graduação Bailey       | Basáltica            | Não possui                                      | CAP 30/45       | 5,4%            | 2% (da massa da mistura)   | Via seca             | ?  | Marshall, graduação Bailey, fadiga e resistência ao dano por umidade induzida   | MR = 3540 MPa; RT = 1,23 MPa; E = 1432,70 kgf; F = 2,7 mm;  |
| Echeverria et al. (2017) | Artigo           | Avaliação da mistura asfáltica com incorporação da borracha de pneu   | Continua      | Faixa C DNIT           | Basáltica            | Cal dolomítica                                  | CAP 50/70       | 4%              | 0,7% (da massa da mistura) | Via seca             | Compactação: 150°C   | Marshall  | F = 4,06 mm E = 1773,39 kgf   |
| Godoi (2017)             | Dissertação      | Aplicação do ensaio de flexão em amostra semicircular para avaliação de trincamento de misturas asfálticas  | Descontínua   | Gap graded             | Basáltica            | Não possui                                      | AB8             | 7,20%           | 15% (da massa do ligante)  | Via úmida            | Agregados: 185°C<br>Ligante: 175°C<br>Compactação: 175°C                 | Dosagem superpave, dano por umidade induzida, compressão diametral e módulo de resiliência  | MR = 2895 MPa; RT = 0,81 MPa;   |
| Mattia e Steiner (2017)  | TCC              | Análise do desempenho de misturas asfálticas quando preparadas com diferentes tipos de ligantes   | Continua      | Faixa C DNIT           | Basáltica            | Não possui                                      | AB8             | 4,40%           | 15% (da massa do ligante)  | Via úmida            | ?  | Marshall, compressão diametral e cântabro   | F = 2,62 mm; E = 1527 kgf; RT = 0,7 MPa   |
| Nunes (2017)             | Dissertação      | Fadiga de misturas asfálticas descontínuas com asfalto-borracha de 4ª geração   | Descontínua   | Gap graded             | Calcária             | AMBS (Estabilizador de ligante mineral ativado) | CAP 50/70       | 8,80%           | 30% (da massa do ligante)  | Via úmida            | Agregados: 175°C a 190°C<br>Ligante: 160°C<br>Compactação: 150°C a 160°C | Dosagem superpave e fadiga  | Maior vida de fadiga das misturas com RAR (borracha com grânulos pré-ativados) em relação as misturas com pe/ef (borracha pelletizada). |
| Silva (2017)             | TCC              | Pavimentação com borracha de pneu: alternativa ambiental ou técnica?  | Continua      | Faixa C DNIT           | Basáltica            | Cal dolomítica                                  | CAP 50/70       | 4,00%           | 1,5% (da massa da mistura) | Via seca             | Agregados: 170 °C<br>Ligante: 160 °C<br>Compactação: 150 °C              | Marshall, compressão diametral e módulo de resiliência  | E = 973 kgf; F = 3,56 mm; MR = 6895 MPa; RT = 0,88 MPa  |
| Faccin (2018)            | Dissertação      | Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul : comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente                   | Continua      | Faixa B DNIT           | Basáltica            | Não possui                                      | AB8             | 6,76%           | 15% (da massa do ligante)  | Via úmida            | Compactação: 155°C   | Dosagem superpave, módulo de resiliência, compressão diametral, módulo complexo e Flow Number   | E = 1287 kgf; F = 3,2 mm; MR = 4966 MPa RT = 1,24   |

Fonte: Autora desta pesquisa (2020).

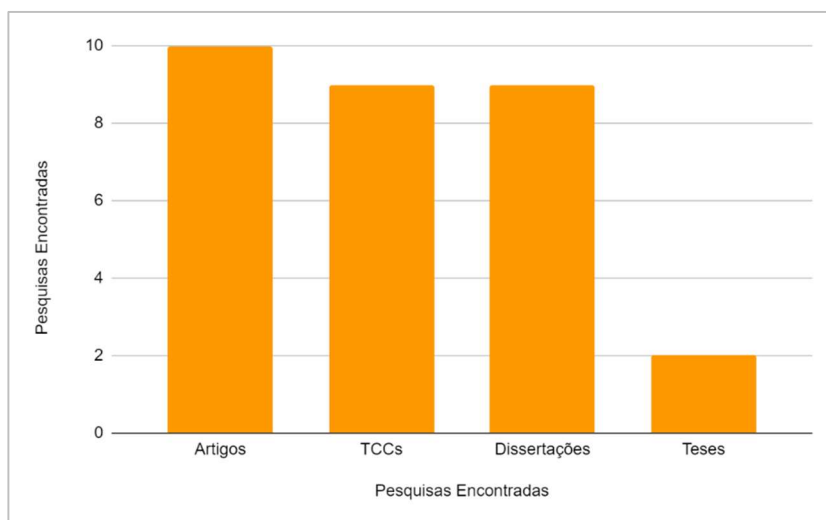
Quadro 6 (b) - Materiais e processos produtivos das pesquisas experimentais que utilizaram concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha no Brasil desde 2015

| AUTOR                             | TIPO DE PESQUISA | TÍTULO DA PESQUISA  | MATERIAIS     |                      |                      |                            |                 | PROCESSOS       |                                  |                      |  |   | RESULTADOS OBTIDOS  |
|-----------------------------------|------------------|---|---------------|----------------------|----------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|----------------------|--|---|---|
|                                   |                  |   | Granulometria | Faixa granulométrica | Origem dos agregados | Adição                     | Tipo de ligante | Teor de ligante | Teor de borracha                 | Processo de produção | Temperaturas empregadas                                  | Ensaio realizado nas misturas   |   |
| Guerra (2018)                     | Artigo           | Avaliação do escorrimento em misturas asfálticas de tipo camada porosa de atrito  | Descontínua   | Aberta               | ?                    | 0,3% de fibras de celulose | ?               | 5,50%           | ?                                | Via úmida            | ?  | Ensaio de escorrimento  | 0% de escorrimento. O asfalto borracha possui escorrimento inferior ao asfalto modificado por polímeros, sendo dispensável a adição de fibras de celulose no AMB. |
| Mocelin (2018)                    | Dissertação      | Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e momas através do modelo de dano contínuo viscoelástico                             | Descontínua   | Gap graded           | Basáltica            | 1,5% de cal dolomítica     | AB8             | 7,00%           | 15% (da massa do ligante)        | Via úmida            | ?  | Marshall, tração direta, fadiga, módulo dinâmico                                  | E = 549 kgf; F = 2,62 mm RT(0,39 cm/min) = 0,86 MPa   |
| Schuster (2018)                   | Dissertação      | Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo                            | Contínua      | Faixa B DNIT         | Basáltica            | Não possui                 | AB8             | 6,76%           | 15% (da massa do ligante)        | Via úmida            | Compactação: 155°C                                       | Fadiga e compressão diametral (mesmas misturas de Faccin, 2018)                   | F = 3,2 mm; MR = 4966; Fator de área de fadiga = 5,386; Módulo dinâmico = 6019 MPa  |
| Silva e Marques (2018)            | TCC              | Estudo comparativo entre o CBUQ convencional e o CBUQ com adição de pó de borracha  | Contínua      | Faixa C DNIT         | ?                    | Não possui                 | CAP 50/70       | 5,00%           | 15% (da massa do ligante)        | Via úmida            | Ligante: 170°C<br>Agregados: 180°C                       | Marshall  | F = 3,74 mm; E = 1681,9 kgf   |
| Silva et al. (2018)               | Artigo           | Análise da substituição parcial do agregado miúdo pétreo de misturas asfálticas pelo resíduo de borracha oriundo da recapagem de pneu                   | Contínua      | Faixa C DNIT         | Basáltica            | Cal dolomítica             | CAP 50/70       | 4,00%           | 0,7% (da massa da mistura)       | Via seca             | Compactação: 150°C<br>Agregados: 170°C<br>Ligante: 160°C | Marshall, compressão diametral, dano por umidade induzida e módulo de resiliência | E = 1773 kgf F=4,06 mm RT = 1,27 MPa<br>MR = 8229 MPa   |
| Silva et al. (2018)               | Artigo           | Utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus na composição de asfalto   | Contínua      | Faixa C DNIT         | ?                    | Não possui                 | ?               | 5,70%           | ?                                | Via úmida            | Ligante: 165°C   | Marshall e compressão diametral   | E = 902 kgf; RT: 0,71 MPa   |
| Thives et al. (2018)              | Artigo           | Avaliação da deformação permanente de misturas asfálticas com asfalto borracha por meio do ensaio de cisalhamento simples a altura constante            | Descontínua   | Caltrans             | Granítica            | Não possui                 | CAP 30/45       | 8,00%           | 17% (da massa do ligante)        | Via úmida            | Ligante: 180°C   | Marshall, RSST-CH (vida a deformação permanente)                                  | As misturas com AMB apresentaram maior vida à deformação permanente que a convencional e o CAP 30/45 teve melhor resultado como ligante base.                     |
| Trichês et al. (2018)             | Artigo           | Avaliação do desempenho de pavimentos com revestimento em camada singular e em camadas integradas   | Contínua      | ?                    | Basáltica            | Cal dolomítica             | ?               | 5,40%           | 15% (da massa do ligante)        | Via úmida            | -  | Marshall, deformação permanente, fadiga e caracterização reológica                | O seguimento em que o revestimento foi executado em camadas integradas teve um desempenho superior aos de camada singular.  |
| Coelho (2019)                     | Tese             | Preparação, caracterização e aplicação de asfalto modificado por madeira/borracha: execução em pista experimental em Macapá-AP                          | Contínua      | Faixa C DNIT         | ?                    | terragem de madeira        | CAP 50/70       | 8,00%           | 2% (madeira/borracha na mistura) | Via seca             | Ligante: 180°C   | Marshall, compressão diametral e módulo de resiliência                            | MR = 6134,54 MPa; RT = 1,18 MPa; F = 4,46 mm; E = 1176 kgf  |
| Escobar (2019)                    | TCC              | Comparação de desempenho de mistura SMA efetuada com asfalto modificado por borracha utilizando agregados do município de Alegrete e concreto asfáltico | Descontínua   | SMA                  | Calcária             | Não possui                 | AB8             | 7,73%           | 15% (da massa do ligante)        | Via úmida            | Ligante: 175°C   | Marshall, compressão diametral, módulo de resiliência e escorrimento              | MR = 5208 MPa; RT = 0,91 MPa;   |
| Lawall (2019)                     | TCC              | Estudo laboratorial de misturas asfálticas com diferentes tipos de ligante  | Contínua      | Faixa C DNIT         | ?                    | Cal hidratada              | AB8             | 5,60%           | 15% (da massa do ligante)        | Via úmida            | ?  | Marshall, compressão diametral e módulo de resiliência                            | F = 4,23 mm; E = 1739 kgf; RT = 0,77 MPa; MR = 4792 MPa;  |
| Silva e Silva Júnior (2019)       | Artigo           | Análise de viabilidade técnico-financeira da aplicação do asfalto borracha em rodovias do Tocantins   | Contínua      | Faixa C DNIT         | ?                    | Não possui                 | CAP 50/70       | 5,76%           | 4% (da massa da mistura)         | Via seca             | ?  | Marshall  | O asfalto borracha é viável do ponto de vista técnico e econômico   |
| Silva e Steiner (2019)            | Artigo           | Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo CPA com incorporação de PEBD no ligante betuminoso CAP 50/70                         | Descontínua   | Faixa II DNER        | ?                    | Não possui                 | AB8             | 5,00%           | 15% (da massa do ligante)        | Via úmida            | ?  | Marshall, cântabro, permeabilidade horizontal/vertical e compressão diametral     | RT = 0,24 MPa; Cântabro: 22,36%   |
| Nogueira et al. (2020)            | Artigo           | Uso da borracha de pneus inservíveis como adição no asfalto para manutenção de estradas   | Contínua      | Faixa A DNIT         | ?                    | Não possui                 | CAP 50/70       | 6,00%           | 1,5% (da massa da mistura)       | Via úmida            | Agregados: 161°C<br>Ligante: 170°C<br>Compactação: 150°C | Marshall e compressão diametral   | E = 420 kgf; F = 3,4 mm   |
| Teixeira, Rodrigues e Dias (2020) | Artigo           | Estudo comparativo entre asfalto modificado com borracha de pneus inservíveis e asfalto convencional  | ?             | ?                    | ?                    | Cal                        | CAP 50/70       | 5,00%           | 20% (da massa do ligante)        | Via úmida            | Ligante: 170°C<br>Compactação: 150°C                     | Marshall, compressão diametral e módulo de resiliência                            | E = 706,5 kgf; RT = 0,68 MPa; RT = 1514,84 MPa  |

Fonte: Autora desta pesquisa (2020).

Dentre as trinta pesquisas presentes selecionadas, existem artigos, trabalhos de conclusão de curso (TCCs), dissertações e teses, e a quantidade de cada um deles nos últimos 5 anos encontra-se na Figura 11.

**Figura 11 - Gráfico dos tipos de pesquisa com ensaios sobre concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha nos últimos 5 anos**

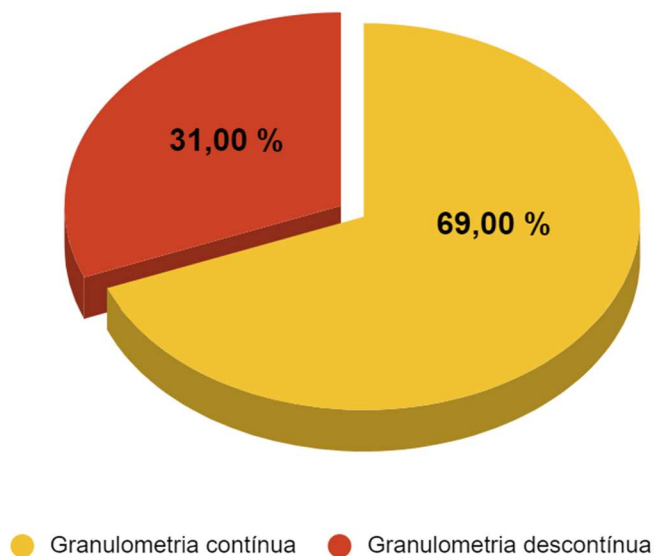


Fonte: Autora desta pesquisa (2020).

#### 4.1.1 Materiais utilizados

Sobre os materiais utilizados na produção do asfalto-borracha, pode-se citar o tipo de granulometria, o qual possui grande influência sobre o comportamento da mistura. O gráfico da Figura 12 mostra o percentual de autores que optaram por utilizar granulometrias contínuas e descontínuas.

**Figura 12 - Tipos de granulometrias utilizadas na produção de concreto asfáltico com asfalto-borracha utilizados nas pesquisas experimentais nos últimos 5 anos**

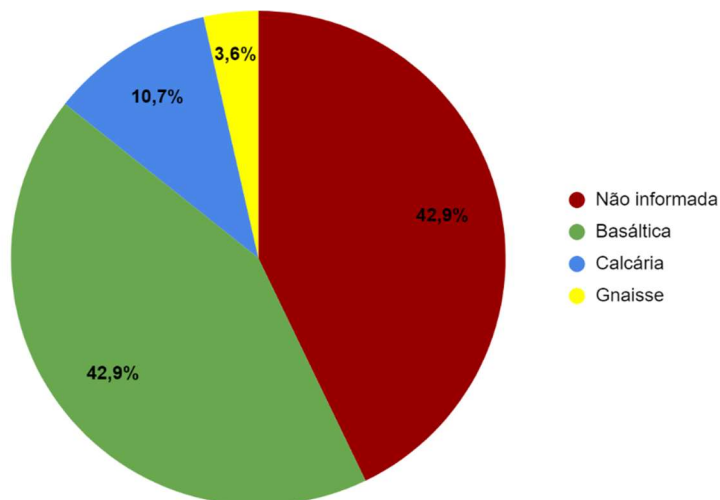


Fonte: Autora desta pesquisa (2020).

O número de pesquisas que optaram por misturas contínuas foi 38% superior, sendo a Faixa C do DNIT a mais utilizada, em 13 das 30 pesquisas analisadas. Conforme Nunes (2017), as granulometrias descontínuas, com pouca quantidade de agregados miúdos, proporcionam maior contato entre os agregados graúdos, o que gera um bom desempenho a uma mistura com asfalto-borracha, devido ao fato de o ligante possuir uma viscosidade superior à do CAP convencional (50/70).

A respeito da origem dos agregados minerais utilizados nas pesquisas, doze dos pesquisadores não forneceram esta informação e dentre os demais o mais utilizado foi agregado de origem basáltica, como mostra a Figura 13.

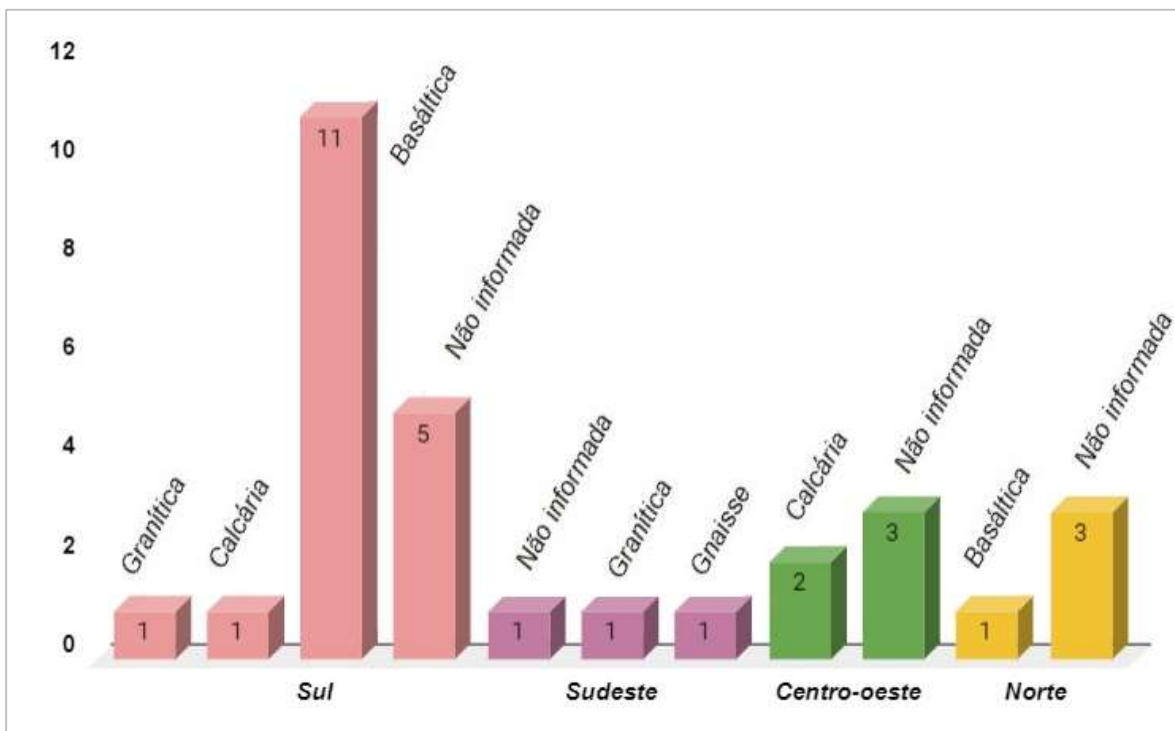
**Figura 13 - Origem mineral dos agregados utilizados nas pesquisas selecionadas**



Fonte: Autora desta pesquisa (2020).

O tipo de agregado a ser utilizado depende também da disponibilidade do material no local, levando isso em conta, foi observada a origem dos agregados utilizados de acordo com a região do Brasil onde foi publicada a pesquisa, então obteve-se o gráfico da Figura 14.

**Figura 14 - Origem mineral dos agregados utilizados nas pesquisas selecionadas de acordo com a região do Brasil**

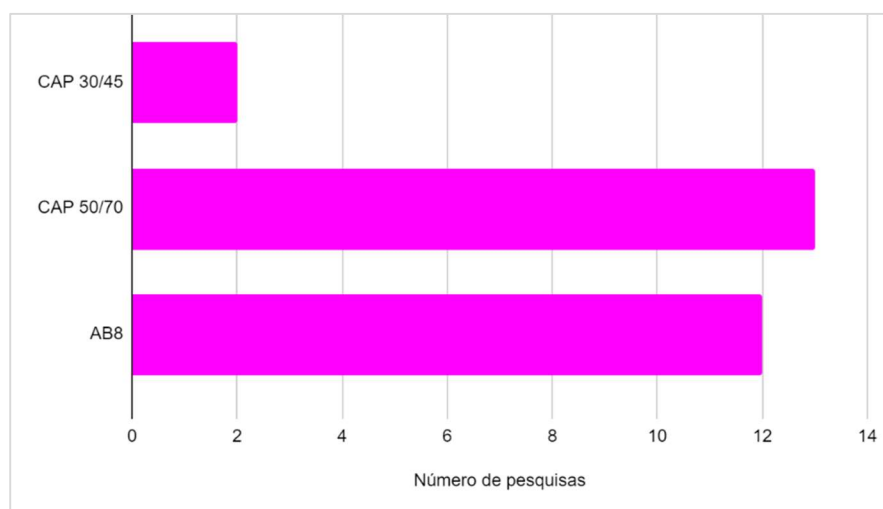


Fonte: Autora desta pesquisa (2020).

Percebe-se que os agregados de origem calcária foram os mais utilizados no Centro-Oeste, granítica e gnaissé no Sudeste e basáltica no Norte e no Sul, região onde houve o maior número de trabalhos selecionados. Devido ao granito ser um material muito utilizado na pavimentação asfáltica, provavelmente os agregados não informados devem ser graníticos, mas como não foram citados, não se pode afirmar.

Sobre os tipos de ligantes utilizados, enquanto alguns pesquisadores optaram pelo uso do AMB proveniente de usinas, do tipo AB8, outros preferiram utilizar os ligantes CAP 30/45 ou CAP 50/70 como base e inseriram o pó de borracha posteriormente no ligante, ou em substituição de uma parte dos agregados. O número de pesquisas que utilizou cada uma dessas opções de ligante asfáltico está na Figura 15.

**Figura 15 - Gráfico do tipo de ligante utilizado nas pesquisas experimentais com concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha nos últimos 5 anos**



Fonte: Autora desta pesquisa (2020).

Outro fator relevante no comportamento das misturas são as adições. Na Figura 16 está elucidado o número de pesquisas, dentre as selecionadas, que utilizaram ou não adições.

**Figura 16 - Adições utilizadas nas pesquisas com concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha desde 2015**



Fonte: Autora desta pesquisa (2020).

Percebe-se que a maioria das pesquisas não utilizou adições, o que pode ser um campo interessante a ser explorado em pesquisas futuras, devido aos benefícios trazidos ao CBUQ. Segundo Guerra (2018) a adição de fibras de celulose reduz o percentual de escorrimento da mistura e Coelho (2019) afirma que a adição de modificadores de asfalto aumenta o envolvimento entre agregados e ligantes, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade da mistura.

#### 4.1.2 Processos produtivos utilizados

Na Figura 17 pode-se observar que o processo de produção de concreto asfáltico com asfalto-borracha mais utilizado nos últimos 5 anos é o via úmida. Neste processo, a borracha triturada representa em torno de 15 a 20% da massa do ligante. Supõe-se que este dado seja consequência de que algumas pesquisas que utilizaram o ligante asfalto-borracha proveniente de usinas (produzido via úmida), já com a borracha adicionada ao ligante, não optando pela adição do pó no agregado e também pelo fato deste tipo de possuir um desempenho superior em campo, como citado anteriormente.

**Figura 17 - Gráfico dos processos de produção de concreto asfáltico com asfalto-borracha utilizados nas pesquisas experimentais nos últimos 5 anos**



Fonte: Autora desta pesquisa (2020).

Outro fator interessante são os teores de ligante utilizados, os quais tiveram uma variação bastante significativa nas pesquisas, sendo utilizados valores de 4,0% a 8,8%. Já o teor de borracha variou de 0,7% a 4,0% da massa da mistura em processos de produção via seca e de 15% a 30% da massa do ligante em misturas produzidas via úmida.

Sabe-se que as temperaturas empregadas nos ensaios são de grande importância para os resultados neste tipo de material. Segundo a norma do 112/2009 do DNIT a temperatura dos agregados deve ser de 10°C a 15°C acima da temperatura do ligante, sem ultrapassar seu ponto de fulgor. Das pesquisas apresentadas no Quadro 6, oito não apresentaram dados de temperatura e nas demais a temperatura dos ligantes variou de 146°C a 180°C, dos agregados de 150°C a 190°C e de compactação de 138°C a 175°C.

Por fim, observa-se que os ensaios mais realizados pelos autores foram o ensaio de dosagem Marshall, ensaio de tração por compressão diametral e o módulo de resiliência. A contagem do número de pesquisas que realizou cada ensaio encontra-se na Tabela 3.

**Tabela 3 - Número de pesquisas selecionadas que utilizaram cada ensaio nas misturas asfálticas**

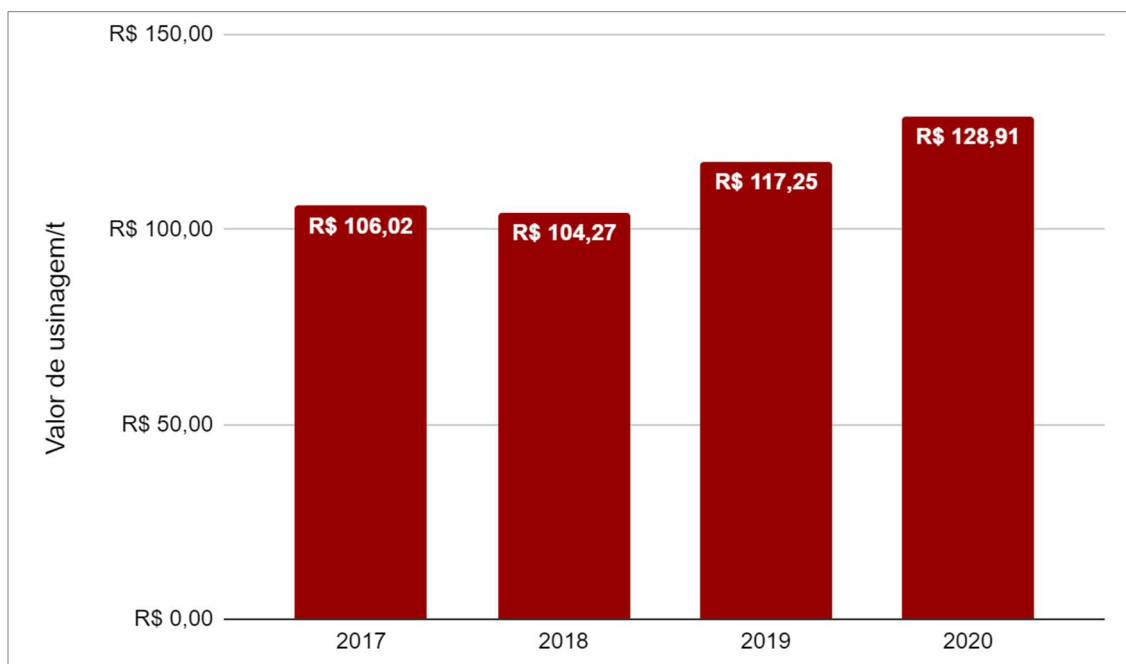
| <b>Ensaio</b>                   | <b>Nº de pesquisas</b> |
|---------------------------------|------------------------|
| Marshall                        | 23                     |
| Tração por compressão diametral | 19                     |
| Módulo de resiliência           | 12                     |
| Fadiga                          | 9                      |
| Dano por umidade induzida       | 7                      |
| Superpave                       | 5                      |
| Deformação permanente           | 3                      |
| Cântabro                        | 3                      |
| Escorrimento                    | 2                      |
| Caracterização reológica        | 1                      |
| Graduação Bailey                | 1                      |
| Permeabilidade                  | 1                      |
| Tração direta                   | 1                      |
| Módulo dinâmico                 | 1                      |
| Módulo complexo                 | 1                      |
| Flow Number                     | 1                      |
| Creep estático                  | 1                      |

Fonte: Autora desta pesquisa (2020).

## 4.2 Levantamento de custo

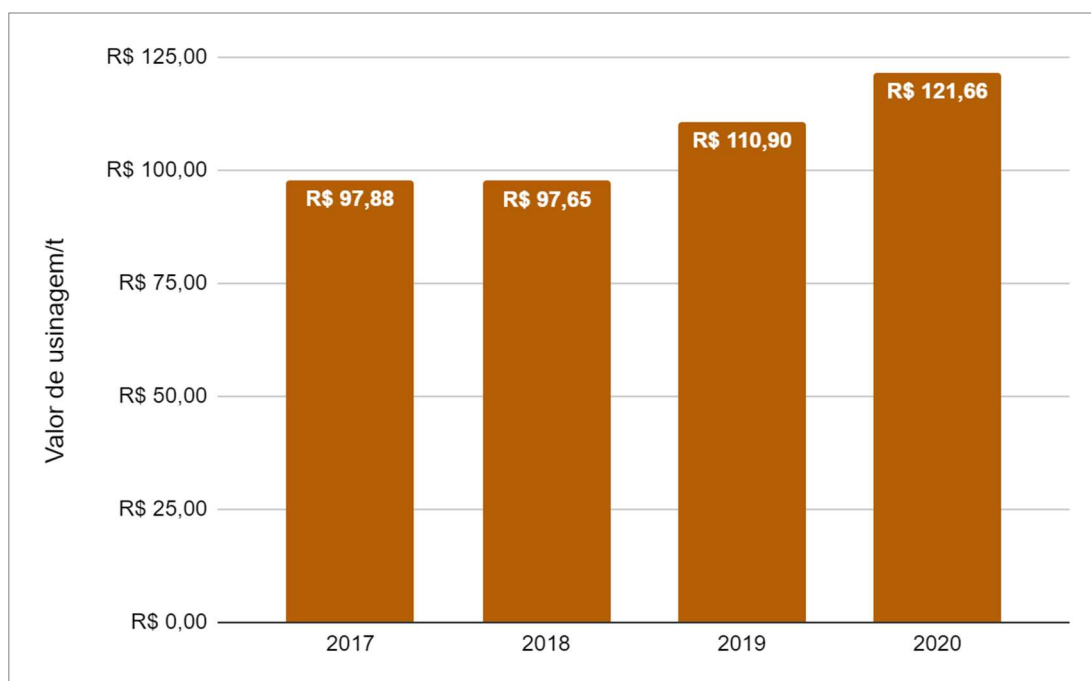
Como resultado da pesquisa em DNIT (2017) encontrou-se relatórios sintéticos de composição de custos do estado de Santa Catarina para os meses de janeiro, março, maio, julho, setembro e novembro de 2017, janeiro, março, maio, julho e outubro de 2018, janeiro, abril, julho e outubro de 2019 e janeiro de 2020. Em posse desses dados, foi possível verificar o valor da usinagem de uma tonelada de concreto asfáltico com borracha via úmida, produzidos com granulometria contínua Faixa C (Figura 18), descontínua *gap-graded* (Figura 19) e do concreto asfáltico convencional, com CAP 50/70 (Figura 20).

**Figura 18 - Gráfico dos valores da usinagem por tonelada de concreto asfáltico com borracha faixa C e brita comercial no estado de SC**



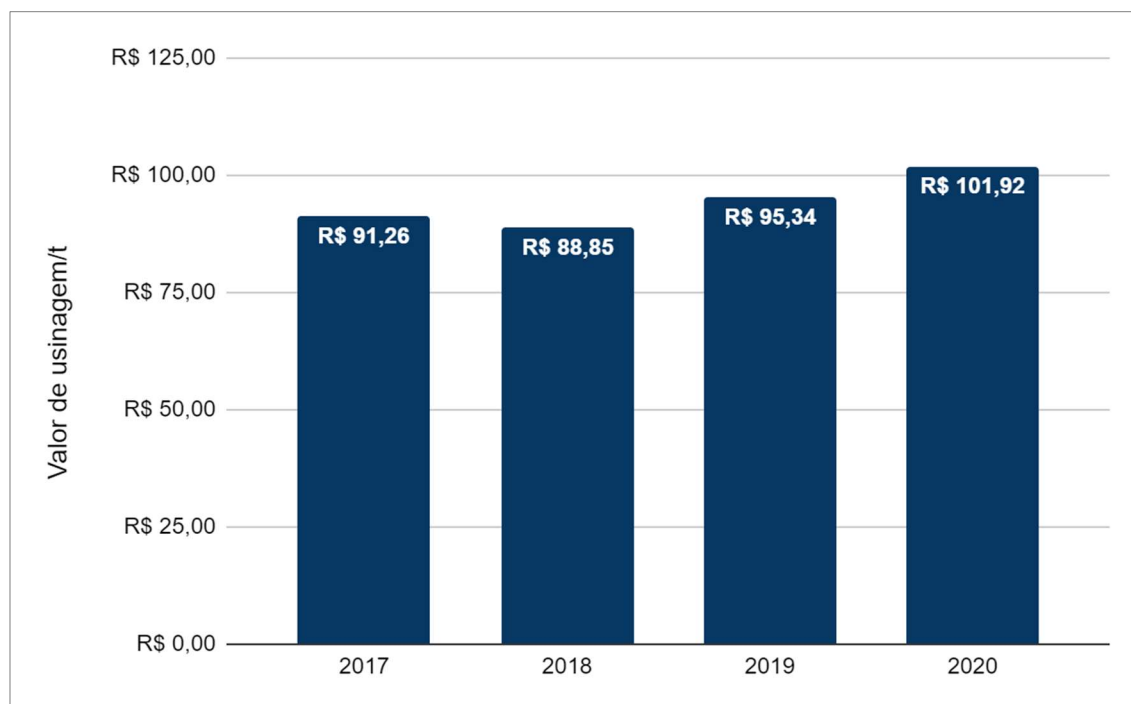
Fonte: Adaptado de DNIT (2017).

**Figura 19 - Gráfico dos valores da usinagem por tonelada de concreto asfáltico *gap-graded* com borracha e brita comercial no estado de SC**



Fonte: Adaptado de DNIT (2017).

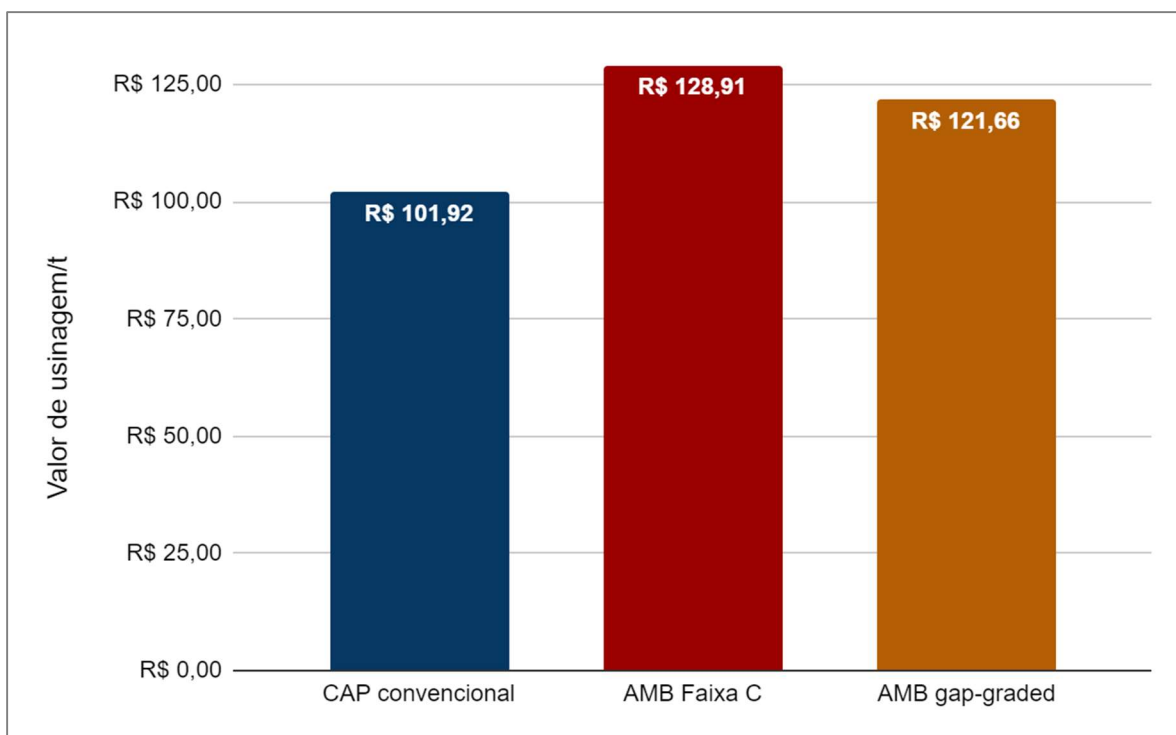
**Figura 20 - Gráfico dos valores da usinagem por tonelada de concreto asfáltico convencional com brita comercial no estado de SC**



Fonte: Adaptado de DNIT (2017).

Analisando os gráficos pode-se perceber que as três misturas aumentaram seus valores ao longo dos anos, com exceção do ano de 2018, no qual o valor decresceu de forma sutil. Pode-se afirmar também que a elevação dos valores foi ameno ao longo dos anos, sendo inferior a 20% do ano de 2017 para 2020 nos três casos. Na Figura 21 pode-se verificar de forma mais clara um comparativo entre os valores das três misturas no ano de 2020.

**Figura 21 - Gráfico dos valores, no estado de SC, da usinagem por tonelada de concreto asfáltico convencional, concreto asfáltico com borracha e faixa C e concreto asfáltico com borracha e granulometria *gap-graded***



Fonte: Adaptado de DNIT (2017).

Comparando as misturas nota-se que as misturas de asfalto-borracha são mais onerosas que o asfalto convencional, sendo esse acréscimo de 20,94% no caso do AMB de faixa C e de 16,23% no caso do AMB *gap-graded*. O uso da granulometria contínua também gera um aumento no valor do CBUQ, sendo 5,62% superior à mistura descontínua. Isso se dá pelo fato de as misturas contínuas possuírem maior quantidade de material granular e pelo processo de produção dos agregados que compõem as misturas descontínuas ser mais simples e o controle de granulometria não ser tão rigoroso, com todas as frações de todos os materiais, como ocorre nas contínuas. Vistas as vantagens relevantes proporcionadas pelo uso do AMB em relação ao CAP convencional e a diferença nos valores, é justificável a indicação deste ligante nas obras de pavimentação.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizado o levantamento dos materiais e processos produtivos utilizados na produção do concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha nos últimos cinco anos no Brasil e avaliado o custo de usinagem de uma tonelada deste material, no estado de SC, desde o ano de 2017, conclui-se que o objetivo central e os objetivos específicos deste estudo foram alcançados.

Verificando as pesquisas laboratoriais desde o ano de 2015, foi notado que o ano de 2018 foi o período de maior ocorrência de estudos sobre a mistura betuminosa analisada. Observou-se também que o ligante mais utilizado é o CAP 50/70, sendo 7,7% e 84,6% mais empregado que o AB8 e que o CAP 30/45, respectivamente. Já sobre os agregados, os de origem basáltica e os de granulometria contínua são os mais adotados. Tratando-se dos processos produtivos, os autores priorizaram o uso do processo via úmida e a não utilização de adições. Acredita-se que a metodologia adotada foi suficiente para alcançar uma percepção dos materiais e processos produtivos mais utilizados nos últimos cinco anos, todavia, para que pudesse ser realizado um comparativo entre as misturas, ressaltando quais teores de ligante, teores de borracha ou curvas granulométricas que resultariam num melhor comportamento mecânico das misturas, seria necessária uma análise bastante minuciosa, levando em consideração todos os ensaios de ligantes e agregados e comparando somente concretos betuminosos com as mesmas características.

Mediante a análise realizada através do Sistema Referencial de Custos de Obras do DNIT, verificou-se que a variação dos valores de usinagem do AMB foi de 17,76% em 4 anos, no estado de Santa Catarina. Notou-se também que este material é mais oneroso que o CAP convencional, o qual também não teve grande ascensão de custo ao longo dos anos. Porém, segundo a matéria da CNT (2018) a Petrobrás aumentou em 12% o preço dos asfálticos, em novembro de 2017 e anunciou reajustes mensais de 8%, o que abalou fortemente o setor construtivo.

Como recomendações para trabalhos futuros sugere-se:

- a) Levantamento dos materiais e processos produtivos utilizados no Brasil nos últimos 5 anos no concreto betuminoso usinado a quente com ligante modificado por polímeros;
- b) Levantamento dos materiais e processos produtivos utilizados mundialmente nos últimos 5 anos no concreto betuminoso usinado a quente com ligante asfalto-borracha;
- c) Avaliar a utilização de diferentes adições em misturas betuminosas usinadas a quente com ligante asfalto-borracha;
- d) Influência da origem dos agregados em misturas betuminosas usinadas a quente com ligante asfalto-borracha.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. 2 ed. Rio de Janeiro: 2005. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15166**: Asfalto modificado - Ensaio de separação de fase. 1 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2004. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 6373: Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder**. 2016. 6 p.

ARAÚJO, Diones Henrique. **Análise comparativa do asfalto borracha com o asfalto convencional e o asfalto com adição de polímeros**. 2015. 90 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Formiga - Unifor-Mg, Formiga, 2015.

ARAÚJO, Marcelo Almeida [et al]. **Análise comparativa de métodos de pavimentação – pavimento rígido (concreto) x flexível (asfalto)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento, ANO 1. VOL. 10, p.187-196. Novembro de 2016.

ARTERIS. Centro de Desenvolvimento Tecnológico. **T 329-91**: Recuperação elástica por torção de cimentos asfálticos modificados (método espanhol). 2014. 4 p.

BASTIDAS, Juan Gabriel. **Asfaltos e misturas modificados com materiais alternativos**. 2017. 242 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

BERNUCCI, L. B. [et al]. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

BERTOLLO, Sandra A. Margarido. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. 2002. 252 f. Tese

(Doutorado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. (2009) **Resolução CONAMA nº 416**, de 30 de setembro de 2009. Publicada no D.O.U. de 1 de outubro de 2009.

CENTRO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Asfalto Borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas**. 2017. 147 p.

CNT. Agência CNT Transporte Atual. **Escalada de preço do material asfáltico ameaça obras rodoviárias no país**. 2018. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/escalada-preco-material-asfaltico-ameaca-obras-rodoviaras-pais>. Acesso em: 11 set. 2020.

CNT Pesquisa de Rodovias 2018: Relatório Gerencial. Brasília: CNT,2018. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br>>. Acesso em: 08 de set. 2019.

COELHO, Johnny Gilberto Moraes. **Preparação, caracterização e aplicação de asfalto modificado por madeira/borracha: execução em pista experimental em Macapá-AP**. 2019. 118 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Recursos Naturais, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

COGO, Lisiani Dalenogare. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas densas modificadas com borracha moída**. 2017. 90 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.

CURVELO JÚNIOR, José Carlos Dias. **Incorporação da borracha de pneus inservíveis em misturas asfálticas empregando-se a graduação Bailey para definição da granulometria dos agregados**. 2017. 46 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

DECONCIC - DEPARTAMENTO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Estudo da cadeia produtiva do asfalto: diagnóstico de problemas e proposições de aprimoramento**. 1º Edição. São Paulo, SP, Brasil, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 204**: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. 1995. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031**: Pavimentos Flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. 2006. 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 095**: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. 2006. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 111**: Pavimentação flexível – Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de material. 2009. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 112**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de material. 2009. 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 130**: Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro – Método de Ensaio. 2010. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - **DNIT - Manual de pavimentação**. 3º Edição. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Sistema de Custos Referenciais de Obras**. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro/sul/sul>. Acesso em: 07 set. 2020.

ECHEVERRIA, José Antônio Santana *et al.* Avaliação da mistura asfáltica com incorporação da borracha de pneu. **XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia**, Ijuí, p. 4, nov. 2017.

ESCOBAR, Vitor Chervenski. **Comparação de desempenho de mistura SMA efetuada com asfalto modificado por borracha utilizando agregados do município de Alegrete e concreto asfáltico**. 2019. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2019.

ESTEVES, Arthur Nunes; SILVA, Orivaldo Gomes da. **Dosagem superpave de misturas asfálticas com grânulos de borracha pré-ativados**. 2016. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

FACCIN, Cléber. **Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente**. 2018. 222 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. 2009. 581 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho / Universidade Federal de Santa Catarina, Braga, Portugal, 2009.

FRAGMAQ. **Saiba como é feito o asfalto ecológico suas vantagens e desvantagens**. 2016. Disponível em: <<https://www.agmaq.com.br/blog/saiba-feito-asfalto-ecologico-vantagens-desvantagens/>>. Acesso em: 06 nov. 2019.

GODOI, Luiza Carbunck. **Aplicação do ensaio de flexão em amostra semicircular para avaliação de trincamento de misturas asfálticas**. 2017. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

GRECA ASFALTOS. **Estudo comparativo do desempenho de um recapeamento utilizando asfalto borracha**. Porto Alegre, p. 1-76, dez. 2006.

GUERRA, Larissa. Avaliação do escoamento em misturas asfálticas do tipo camada porosa de atrito. **Salão de Iniciação Científica - XXX Sic**: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 1, ot. 2018.

IBGE. **IBGE mapeia a infraestrutura dos transportes no Brasil**. 2013. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/14707-asi-ibge-mapeia-a-infraestrutura-dos-transportes-no-brasil>>. Acesso em: 05 out. 2019.

KALIL, Erick; OLIVEIRA, Luiz Daniel Miranda de; FERREIRA, Vitor Soares. Estudo da Utilização do Asfalto Modificado com Borracha Triturada de Pneu no Brasil. **15th LACCEI international multi-conference for engineering, education and technology**, Boca Raron, Fl, EUA, jul. 2017.

LAWALL, Luísa. **Estudo laboratorial de misturas asfálticas com diferentes tipos de ligante**. 2019. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2019.

MARCON, Matheus Felipe. **Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímeros SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais**. 2016. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Notas de aula da disciplina de pavimentação – Departamento de Transportes e Geotecnia TRN 032**. 2012. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2012/03/Notas-de-Aula-Prof.-Geraldo.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2020.

MATTIA, Júlio César Venturini De.; STEINER, Luiz Renato. **Análise do desempenho de misturas asfálticas quando preparadas com diferentes tipos de ligantes**. 2017. 23 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2017.

MENDES, Celso Bráulio Alves; NUNES, Fábio Rinaldi. **Asfalto borracha - minimizando os impactos ambientais gerados pelo descarte de pneus**

**inservíveis no meio ambiente.** 2009. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção-Civil, Faculdade Brasileira - Univix, Vitória, 2009.

MERIGHI, Cecília Fortes. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu.** 2015. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

MICHELS, Maikel P.; ARNS, Pedro. **Análise de misturas asfálticas realizadas com ligante asfáltico convencional e com o modificado com borracha aplicando o método Marshall.** 2015. 20 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.

MOCELIN, Douglas Martins. **Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico.** 2018. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

NEVES FILHO, Cláudio Luiz Dubeux. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha.** Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2004.

NOGUEIRA, Glairton [et al]. **Uso da borracha de pneus inservíveis como adição no asfalto para manutenção de estradas.** RENEFARA, v.15, n.1, p. 7. Janeiro de 2020.

NUNES, Letícia Cardoso. **Fadiga de misturas asfálticas descontínuas com asfalto-borracha de 4ª geração.** 2017. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ODA, Sandra. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação.** 2000. 280 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2000.

OLIVEIRA, Cláudio Roberto de et al. **Experimentos em misturas asfálticas com adição de borracha moída de pneus**. Universidade do Vale do Paraíba - Encontro Latino Americano de Pós Graduação, Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, São José dos Campos, SP, p.1-6, out. 2009.

PARANÁ. Agência de Notícias do Paraná. Governo do Estado do Paraná. **Asfalto na PR-912 garante novos tempos a Coronel Domingos Soares**. 2020. Disponível em: <http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=107484&tit=Asfalto-na-PR-912-garante-novos-tempos-a-Coronel-Domingos-Soares>. Acesso em: 11 set. 2020.

PETROBRÁS. **Asfalto - Informações Técnicas**. Rio de Janeiro, 2019.

PINTO, Joana Isabel Baptista Rua. **Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2003.

RAIMUNDO, Huri Alexandre. Apostila de Pavimentação. Material Apostilado. UNISUL. Curso de Graduação em Engenharia Civil. Disciplina de Pavimentação. Palhoça/SC. 2015.

SANTOS, Aline Selau. **Segmentos monitorados de Araranguá: construção e previsão de desempenho do revestimento em camadas singulares e integradas**. 2016. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SANTOS, Caio Rubens Gonçalves. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. 2005. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2005.

SCHUSTER, Sílvio Lisboa. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano**

**contínuo**. 2018. 270 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

SILVA, Anngelita Sousa da; MARQUES, Vanessa Procksch. **Estudo comparativo entre o CBUQ convencional e o CBUQ com adição do pó de borracha**. 2018. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unievangélica, Anápolis / GO, 2018.

SILVA, Gabriela Pires da. **Pavimentação com borracha de pneu: alternativa ambiental ou técnica?** 2017. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2017.

SILVA, Gabriela Pires da *et al.* Análise da substituição parcial do agregado miúdo pétreo de misturas asfálticas pelo resíduo de borracha oriundo da recapagem de pneu. **32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, Gramado, p. 11, nov. 2018.

SILVA, G. C.; SILVA JÚNIOR, F. V. Análise de viabilidade técnico-financeira da aplicação do asfalto borracha em rodovias do Tocantins. **Engineering Sciences**, v.7, n.2, p.69-76, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2019.002.0008>

SILVA, Karini Boneli; STEINER, Luiz Renato. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo CPA com incorporação de PEBD no ligante betuminoso CAP 50/70**. Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil UNESC, VOL. 2, p.22-26. 2019.

SILVA, Luzilene Souza [et al]. **Utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus na composição de asfalto**. RCT - Revista de ciência e tecnologia, VOL. 4, p.13. 2018.

SILVEIRA, Evanildo da. Reciclagem de pneus. **Fapesp**: Revista pesquisa, Sp, v. 246, p. 78-79, ago. 2016. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/reciclagem-de-pneus/>. Acesso em: 19 ago. 2020.

SINICESP. Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo. **Desenvolvimento dos revestimentos asfálticos produzidos com asfaltos modificados por polímeros e borracha de pneus no Brasil**. 2012. José Antônio A. Junior. Disponível em: <<http://sinicesp.org.br/materias/2012/bt07a.htm>>. Acesso em: 20 out. 2019.

SOARES, Jorge Barbosa; CAVALCANTE, Verônica Teixeira Franco. **Dosagem "passo a passo"**. Universidade Federal do Ceará: Departamento de Engenharia de Transportes, Fortaleza - Ce, p. 1-10, [S.d.].

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. 280 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TEIXEIRA, Julia Naves; RODRIGUES, Hellen Mara Alves Chaves; DIAS, Julia. **Estudo comparativo entre asfalto modificado com borracha de pneus inservíveis e asfalto convencional**. Revista científica eletrônica UNILAVRAS, ANO 2. VOL. 1, p.16. Novembro de 2020.

THIVES, Liseane Padilha *et al.* Avaliação da deformação permanente de misturas asfálticas com asfalto borracha por meio do ensaio de cisalhamento simples a altura constante. **32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, Gramado, p. 10, nov. 2018.

TRICHÊS, Glicério *et al.* Avaliação do desempenho de pavimentos com revestimento em camada singular e em camadas integradas. **32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, Gramado, p. 12, nov. 2018.

ZATARIN, Ana Paula Machado *et al.* **Viabilidade da pavimentação com asfalto-borracha**. Universidade Federal de Santa Catarina – Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis SC, v.5, n.2, p.649-674, mar. 2017.