

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
NÍVEL MESTRADO**

**FABRÍCIO FAGUNDES DORNELES**

**VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE LIGANTE MODIFICADO COM  
BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS PELO PROCESSO ÚMIDO (*WET  
PROCESS*) ATRAVÉS DO SISTEMA NÃO ESTOCÁVEL (*CONTINUOUS  
BLENDING*), PARA CONCRETO ASFÁLTICO.**

**SÃO LEOPOLDO**

**2018**

FABRÍCIO FAGUNDES DORNELES

**VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE LIGANTE MODIFICADO COM  
BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS PELO PROCESSO ÚMIDO (*WET  
PROCESS*) ATRAVÉS DO SISTEMA NÃO ESTOCÁVEL (*CONTINUOUS  
BLENDING*), PARA CONCRETO ASFÁLTICO.**

Dissertação apresentada como requisito  
parcial para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Civil, pelo Programa de  
Pós-Graduação em Gerenciamento de  
Resíduos da Universidade do Vale do Rio  
dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Profa. Dra. Regina Célia Espinosa Modolo

São Leopoldo

2018

D713v

Dorneles, Fabrício Fagundes

Viabilidade técnica da produção de ligante modificado com borracha de pneus inservíveis pelo processo úmido (wet process) através do sistema não estocável (continuous blending), para concreto asfáltico / Fabrício Fagundes Dorneles. – 2020.

101 f. : il. ; color. ; 30cm.

Dissertação (mestrado em Engenharia de Civil) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil, São Leopoldo, RS, 2020.

Orientadora: Profa. Dra. Regina Célia Espinosa Modolo.

1. Engenharia civil. 2. Viabilidade técnica - Ligante modificado - Borracha de pneus inservíveis. 3. Concreto asfáltico. I. Título. II. Modolo, Regina Célia Espinosa.

CDU 624

FABRÍCIO FAGUNDES DORNELES

**VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE LIGANTE MODIFICADO COM  
BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS PELO PROCESSO ÚMIDO (*WET  
PROCESS*) ATRAVÉS DO SISTEMA NÃO ESTOCÁVEL (*CONTINUOUS  
BLENDING*), PARA CONCRETO ASFÁLTICO.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Gerenciamento de Resíduos da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em ( 26/08/2020 )

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Feliciane Andrade Brehm – UNISINOS - PPG Engenharia Civil

---

Prof. Dr. Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta – Universidade de Aveiro, Depto de Engenharia Civil

## RESUMO

Nas últimas décadas tem-se pesquisado a utilização da borracha do pneu inservível na construção civil, com o objetivo de dar um destino correto a esse resíduo de pós-consumo. O presente trabalho teve como objetivo geral realizar uma análise de viabilidade técnica da produção de ligante modificado com borracha de pneus inservíveis pelo processo úmido (Wet Process) através do sistema não estocável (Continuous Blending), para concreto asfáltico. Foi utilizado o processo úmido, para o qual se definiu doses de diferentes formulações de ligante Asfalto-Borracha, com base na variação dos principais fatores que interferem no seu desempenho, tais como: granulometria da borracha, temperatura e tempo de mistura. Para analisar a influência destas variáveis e também parâmetros relevantes do produto, executou-se os seguintes testes: Penetração, Ponto de Amolecimento, Índice de Susceptibilidade Térmica, Massa Específica e Estabilidade à Estocagem. Os resultados obtidos demonstraram como fatores intervenientes mais importantes, entre os analisados, o percentual de Borracha, seguido da temperatura de mistura e do tempo de digestão. A importância da granulometria foi percebida pelo fato das partículas de menor diâmetro apresentarem maior superfície específica facilitando a interação ligante e modificador. O que não dispensa a combinação de outras variáveis. Foi possível concluir que há viabilidade técnica de se produzir ligante Asfalto-Borracha pelo processo úmido (Wet Process) através do sistema não estocável (Continuous Blending).

**Palavras-chave:** borracha de pneus inservíveis; ligante modificado; concreto asfáltico.

## ABSTRACT

In the last decades, the use of rubber from waste tires in civil construction has been researched, with the objective of giving a correct destination for this waste. The present work had as general objective to carry out an analysis of the technical viability of the production of binder modified with rubber from waste tires by the wet process (Wet Process) through the non-stocking system (Continuous Blending), for asphalt concrete. For the execution of the experiment, the wet process was used, for which different dose formulations of Asphalt-Rubber binder were defined, based on the variation of the main intervening factors in the performance, such as: rubber particle sizes, temperatures and mixing times. To analyze the influence of these variables and also relevant product parameters, the following tests were carried out: Penetration, Softening Point, Thermal Susceptibility Index, Specific Mass and Storage Stability. The results obtained demonstrated as the most important intervening factors, among those analyzed, the percentage of Rubber, followed by the mixing temperature and digestion time. The importance of granulometry was perceived in the fact that the smaller diameter particles have a larger specific surface, facilitating the ligand and modifier interaction, yet it still needs a certain combination between the other variables. It was clear the possibility of the technical feasibility of producing Asphalt-Rubber binder by the wet process (Wet Process) through the non-stockable system (Continuous Blending).

**Key-words:**

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Faixas granulométricas específicas para tecnologia PlusRide. FONTE: HASSAN (2012). .....	28
Tabela 2 - Faixas granulométricas especificam para tecnologia Genérica. FONTE: HASSAN (2012). .....	28
Tabela 3 – Especificações do Ministério de Transportes de Ontário, Canadá, para o pó de borracha usado pela via úmida no processo <i>Continuous Blending</i> (CPR, 2017). .....	52
Tabela 4 - Especificação do Ministério de Transportes de Ontário, Canadá, para o pó de borracha usado pela via úmida no processo <i>Terminal Blending</i> (CPR 2017). 53	
Tabela 5 - Especificações do Departamento de Transportes da Arizona, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida (CPR, 2017). .....	53
Tabela 6 – Especificações do Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans), Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida. Fonte (CPR, 2017). 54	
Tabela 7 - Especificações do Departamento de Transportes do Texas, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida. Fonte (CPR, 2017). .....	55
Tabela 8 - Especificações do Departamento de Transportes da Flórida, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida. Fonte (CPR, 2017). .....	55
Tabela 9 - Especificações do Departamento de Transportes de New Jersey, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida. Fonte (CPR, 2017) .....	55
Tabela 10 - Especificações do Departamento de Transportes de Massachusetts, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida. Fonte (CPR, 2017) .55	
Tabela 11 - Especificação de asfalto borracha segundo a ASTM D6114. ....	56
Tabela 12 - Especificação para as partículas de borracha. FONTE: Asphalt Academy (2007). .....	57
Tabela 13 - Características do asfalto borracha para revestimentos selantes (S-R1) e para concretos asfálticos (A-R1). FONTE: Asphalt Academy (2007). .....	59
Tabela 14 - Temperatura e tempos de estocagem, mistura e aplicação do asfalto borracha. FONTE: Asphalt Academy (2007). .....	60
Tabela 15 - Especificação Austroads AGPT/T190 para as partículas de borracha empregadas na modificação de ligantes asfálticos. FONTE: Austroads (2014). .....	61
Tabela 16 - Especificação de asfalto borracha do DNIT 111/2009-EM. FONTE: DNIT (2009). .....	63

Tabela 17 - Comparativo das especificações técnicas de órgãos estaduais com as especificações técnicas do DNIT. FONTE: CPR (2017). .....	64
Tabela 18 - Características do Ligante Modificado. FONTE: DER/RJ (2015). .....	65
Tabela 19 - Variáveis independentes e níveis de estudo, Fonte: Autor. ....	68
Tabela 20 - Ensaio de CAP modificado, Fonte: Autor .....	68
Tabela 21 – Análise de porcentagem da granulometria no material, Fonte: Autor....	70
Tabela 22 – Análise de porcentagem da faixa granulometria no material. Fonte: Autor.....	70
Tabela 23 – Característica do ligante de referência. Fonte: Autor. ....	72
Tabela 24 –Formulações e Condições de Trabalho, Fonte: Autor. ....	72
Tabela 25 – Resultados dos ensaios de penetração, Fonte: Autor. ....	79
Tabela 26 – Relação dos resultados e especificações dos órgãos para o ensaio de penetração, Fonte: Autor.....	81
Tabela 27 – Resultado dos ensaios de ponto de amolecimento, Fonte: Autor.....	82
Tabela 28 – Relação dos resultados e especificações dos órgãos para o ensaio de Ponto de Amolecimento, Fonte: Autor.....	84
Tabela 29 – Resultados para o Índice de Susceptibilidade Térmica, Fonte: Autor. ..	85
Tabela 30 – Resultados para ensaio o de Massa Específica, Fonte: Autor. ....	86
Tabela 31 – Relação dos resultados e especificações dos órgãos para o ensaio de Massa Específica, Fonte: Autor.....	88
Tabela 32 – Resultados dos ensaios de Estabilidade a Estocagem, Fonte: Autor....	89

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de fabricação do Asfalto-Borracha pela via úmida pelo sistema estocável ( <i>Terminal Blending</i> ), Fonte: (PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICÁ, 2010).....	33
Figura 2 – Esquema de fatores intervenientes do Sistema <i>Continuous Blending</i> . ....	35
Figura 3 – Esquema de fabricação do Asfalto-Borracha pela via úmida pelo sistema não estocável ( <i>Continuous Blending</i> ) (CALTRANS, 2005). ....	36
Figura 4 – Área trincada em pavimentos construídos com Asfalto-Borracha e ligante asfáltico convencional. FONTE: Way <i>et al.</i> , (2009). ....	51
Figura 5 - Esquema do equipamento para produção de asfalto borracha. FONTE: Asphalt Academy (2007). ....	58
Figura 6 - Relação Viscosidade X Temperatura X Tempo do ligante modificado por borracha de pneus na África do Sul. FONTE: Asphalt Academy (2007). ....	59
Figura 7 – Amostra do saco de borracha. Fonte: Autor.....	69
Figura 8 – Processo de análise de percentagem granulométrica das partículas de borracha Fonte: Autor .....	70
Figura 9 - Análise da percentagem da faixa granulométrica da borracha. Fonte: Autor .....	71
Figura 10 – Processo de separação das granulometrias da borracha. Fonte: Autor.	71
Figura 11 – Processo produção do Asfalto-Borracha. Fonte: Autor .....	74
Figura 12 – Determinação da Penetração. Fonte: Autor .....	75
Figura 13 – Ensaio de Ponto de Amolecimento. Fonte: Autor .....	76
Figura 14 – Picnômetro. Fonte: Autor. ....	77
Figura 15 - Relação Percentagem de borracha (%) X Penetração(1/10mm) X Tempo de Mistura(min) X Temperatura de Mistura(C°).....	80
Figura 16 - Relação Percentagem de borracha (%) X Ponto de Amolecimento(C°) X Granulométrica (min) X Tempo de Mistura (Min.). ....	83
Figura 17 - Relação Percentagem de borracha (%) X Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> ) X Porcentagem da borracha (%) X Tempo de Mistura (Min.). ....	87
Figura 18 - Relação Tempo de Mistura (min.) X Estabilidade (°C) X Granulometria (%) X Temperatura (°C). ....	90

## LISTA DE SIGLAS

SBS	Estireno-butadieno
EVA	Espuma vinílica acetinada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1 Pneus, Impactos Ambientais e Logística Reversa</b> .....	<b>15</b>
3.1.1 Introdução .....	15
3.1.2 Pneus de borracha vulcanizada .....	16
3.1.3 Impactos ambientais .....	17
3.1.4 Importância da logística reversa.....	18
<b>3.2 Reciclagem de Pneus Inservíveis</b> .....	<b>19</b>
3.2.1. Muros de gravidade e obras de contenção .....	19
3.2.2. Estruturas de absorção de energia ou barreiras de inércia .....	19
3.2.3. Controle de Erosão.....	19
3.2.4 Estabilidade de ombreiras .....	20
3.2.5 Geogrelha.....	20
3.2.6 Obras de drenagem .....	20
<b>3.2 Legislação</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3 Pavimentos Rodoviários Brasileiros</b> .....	<b>22</b>
<b>3.4 Utilização de Borracha de Pneus em Misturas Asfálticas</b> .....	<b>23</b>
3.4.1 Histórico .....	23
<b>3.5 Processos de Incorporação de Borracha em Pavimentos Asfálticos</b> .....	<b>26</b>
3.5.1 Processo seco.....	26
3.5.1.1 Características da granulometria da borracha.....	27
3.5.1.2 Dosagem de misturas asfálticas modificadas pela via seca .....	28
3.5.2 Processo úmido.....	29
3.5.3. Sistemas de processo por via úmida.....	31
3.5.3.1 Terminal Blending.....	31
3.5.3.2 Continuous Blending .....	33
<b>3.6 CARACTERÍSTICAS DO ASFALTO-BORRACHA</b> .....	<b>36</b>
3.6.1 Fenômeno de interação.....	37

	10
3.6.2 Fatores que influenciam o comportamento do Asfalto-Borracha.....	40
3.6.3 Penetração.....	44
3.6.4 Ponto de amolecimento.....	44
3.6.4 Viscosidade.....	45
3.6.5 Parâmetros reológicos.....	46
3.6.6 Estabilidade à estocagem.....	46
<b>3.7 CARACTERÍSTICAS DO CBUQ PRODUZIDO COM BORRACHA DE PNEU..</b>	<b>47</b>
3.7.1 Dosagem do CBUQ modificado.....	47
3.7.2 Resistência a tração.....	48
3.7.3 Resistência à deformação Permanente.....	49
3.7.4 Resistência à trinca por fadiga.....	50
3.7.5 Resistência à reflexão de trincas.....	50
3.7.6 Durabilidade.....	51
<b>3.8 NORMATIVAS DE ASFALTO-BORRACHA.....</b>	<b>52</b>
3.8.1 Norma Estado Unidense e Canadense.....	52
3.8.2 Normas na República da África do Sul.....	57
3.8.3 Normas no continente Oceânico.....	60
3.8.4. Normas no Brasil.....	62
<b>3.9 Experiências Brasileiras com Asfalto-Borracha pelo Sistema <i>Continuous Blending</i>.....</b>	<b>65</b>
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>67</b>
<b>4.1 Considerações Iniciais.....</b>	<b>67</b>
<b>4.2 Planejamento Experimental.....</b>	<b>67</b>
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>69</b>
<b>5.1 Resíduos de Pneu (Granulado de Borracha).....</b>	<b>69</b>
5.1.1 Análise granulométrica.....	69
<b>5.2 CAP.....</b>	<b>72</b>
<b>5.3 Definições das Formulações e Condições de Trabalho.....</b>	<b>72</b>
<b>5.4 Preparo das Amostras de ligante modificado.....</b>	<b>73</b>
<b>5.5 Caracterização das amostras de ligante modificado.....</b>	<b>74</b>
5.5.1 Determinação da penetração.....	74
5.5.2 Determinação do ponto de amolecimento – Método Anel e Bola.....	75
5.5.3 Índice de susceptibilidade térmica.....	76
5.5.4 Densidade e massa específica.....	77

5.5.5 Estabilidade à estocagem .....	78
<b>6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>78</b>
<b>6.1 Determinação da Penetração .....</b>	<b>78</b>
<b>6.2 Determinação do Ponto de Amolecimento .....</b>	<b>81</b>
<b>6.3 Índice de Susceptibilidade Térmica (IST).....</b>	<b>84</b>
<b>6.4 Determinação da Massa Específica .....</b>	<b>85</b>
<b>6.5 Estabilidade à Estocagem .....</b>	<b>88</b>
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>91</b>
<b>7.1 Conclusão .....</b>	<b>91</b>
<b>7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>92</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A borracha do pneu é um material durável, resistente, flexível e pode manter o seu volume sob carga, tornando-a um material adequado a ser reutilizado. Nas últimas décadas pesquisou-se a utilização desse resíduo inservível na construção civil, que é o principal consumidor de matéria-prima no mundo todo. (N. F. MEDINA *et al.*, 2018).

Na produção de misturas asfálticas modificadas verifica-se há décadas, a possibilidade de reaproveitamento de borracha recuperada de pneus inservíveis através de dois processos: incorporação por via seca e por via úmida.

O interveniente da utilização em larga escala dos asfaltos que são modificados por outros polímeros como estireno butadieno randômico (SBS) e copolímero de estireno e butadieno (EVA), quando comparados aos ligantes modificados com borracha de pneus moídas está relacionado à estabilidade. As misturas preparadas em planta ou terminais, como é o caso das mesmas com os polímeros citados referidos anteriormente, o produto resultante do processo pode ser estocado e entregue na obra.

Comumente, o processo do ligante modificado com borracha de pneus inservíveis é *just in time*, sistema intitulado *Continuous Blending*, ou seja, preparado no canteiro de obras e utilizada para executar o pavimento imediatamente. Entretanto, diferentemente de outros países, no Brasil o habitual é utilizar o processo úmido através do sistema *Terminal Blending*, processando a mistura em um terminal central e transportando até o local da execução.

Considerando a necessidade de escoar elevadas quantidades deste resíduo sólido ainda disposto em aterros de modo frequente, este estudo tem como objetivo geral verificar a viabilidade técnica da produção de ligante modificado com borracha de pneus inservíveis, pelo processo úmido (*Wet Process*) através do sistema não estocável (*Continuous Blending*), para a produção de concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ.

## 1.1 Justificativa

A sociedade moderna consolidou um modelo de desenvolvimento baseado na exploração da matéria prima, sem pensar na reciclagem pós consumo. Esse modelo vem gerando ao longo dos anos, uma enorme degradação ambiental, principalmente por ignorar os limites dos recursos naturais. A disposição final da matéria tem elevados custos, que mexem com a cadeia produtiva da sociedade. Dessa forma, a reciclagem, reutilização e tratamento de resíduos são as soluções para reduzir o impacto das atividades da sociedade no meio ambiente. Costumeiramente os pneus descartados ou inservíveis eram destinados a aterros sanitários ou também dispostos de forma inadequada em lugares indevidos, trazendo risco para saúde pública sendo foco para parasitas e insetos transmissores de doenças e perigo de incêndios acidentais. Entretanto, o estabelecimento de um aterro sanitário para o descarte de pneus inservíveis tem se dificultado, devido à impossibilidade de aprovação do licenciamento ambiental para novas áreas afins.

Um destino de reciclagem da borracha de pneu é a incorporação no asfalto, que causa a diminuição da fragilidade térmica, comparado com o asfalto convencional; O aumento da flexibilidade que se dá pela grande concentração de elastômeros na borracha e a melhor aglutinação do ligante aos agregados, a resistência ao desgaste aumenta pela a presença de antioxidantes e carbono na borracha, que ajudam a diminuir o envelhecimento por oxidação; já o aumento do ponto de amolecimento se dá devido ao ligante possuir um nível elevado dessa característica que o convencional, por consequência também ocorre à melhoria na resistência da formação de trilhas de roda.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade técnica da produção de ligante modificado com borracha de pneus inservíveis, pelo processo úmido (*Wet Process*) através do sistema não estocável (Continuous Blending), para a produção de concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ.

## 2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do estudo, necessários para alcançar o objetivo geral serão apresentados a seguir:

- a) Verificar a influência da adição da borracha no tempo e na temperatura de mistura e interações nas propriedades do ligante;
- b) Definir as melhores condições de trabalho para obtenção ligante asfáltico modificado com adição de borracha; e
- c) Avaliar a viabilidade técnica da produção do ligante asfáltico modificado.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Pneus, Impactos Ambientais e Logística Reversa

##### 3.1.1 Introdução

Um dos problemas gerados pelo aumento da frota de veículos no Brasil nos últimos anos é o acréscimo na produção de pneus, por consequência a geração de uma maior quantidade de pneus inservíveis rejeitados, geralmente dispostos de maneira inadequada no meio ambiente, ocasionando adversidades ambientais. A falta de conscientização em gerenciar da forma correta esse resíduo, acaba por se tornar um complexo aspecto poluente.

De acordo com a resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, os fabricantes de pneus têm a obrigação de dar um descarte corretamente ambiental, porém a resolução não tem sido devidamente obedecida. Muitos pneus são descartados de forma errônea em rios, ruas, lixões, matas, poluindo o meio ambiente e se tornando um problema para a população, ocasionando doenças, como a dengue, zika, chikungunya (SILVA, *et al.*, 2013). De fato, o que se verifica é a ocupação de área, impacto ambiental, que pode trazer consequências como a proliferação de agentes patogênicos que colocam em risco a saúde humana.

O Ministério do Meio Ambiente estima que no Brasil, cerca de 100 milhões de pneus inservíveis estão dispostos em aterros, terrenos baldios, rios e lagos. Os pneumáticos são causadores de diversos passivos ambientais, e a cada ano, mas de 60 milhões de pneus são produzidos no país, aumentando a necessidade da compreensão em descartar esse resíduo de maneira correta (ANIP, 2015)

De maneira geral, para se resolver esses problemas se tem muito a fazer. Em relação das estradas, por exemplo, verifica-se a necessidade de construção de pavimentação de grandes extensões e outras que necessitam de recapeamento ou reconstrução. Em relação ao problema dos pneus inservíveis, necessita-se de soluções de reciclagem para os mesmos. Ainda assim, se tem pouco ou quase nenhum incentivo governamental, econômico e financeiro para pesquisas e estudos que solucionem essas questões. A utilização de materiais descartados que possam promover a qualidade, durabilidade e segurança, facilitaria esta gestão organizada destes materiais ou resíduo, e possivelmente, tornaria mais econômica à

manutenção e implantação de estradas, que também ajudariam na questão de poluição ao meio ambiente (LUCIANO, *et al.*, 2017).

Em suma, o modal rodoviário brasileiro, apresenta dois grandes problemas que devem ser sanados para que tenhamos segurança e eficiência nas rodovias, que por sua vez significa economia nos custos de transporte e um país com maior condição de competitividade no mercado nacional, na exportação dos seus produtos e também solucionar um problema ambiental e de saúde (CNT, 2016).

### 3.1.2 Pneus de borracha vulcanizada

Em particular, o desenvolvimento do processo de vulcanização permitiu a produção rentável de grandes volumes de borracha de alta qualidade, um material durável, forte, flexível e que mantém seu volume sob cargas (C. GOODYEAR, 1844). Por essas características e pelo baixo custo, a borracha é utilizada em muitos setores industriais. A produção global atual de borracha é de aproximadamente 26,7 Mtons, dos quais 12,31 M são naturais e 14,46 M sintéticos borracha para produzir pneus e outros produtos industriais (ETRA, 2016).

Apesar de o norte americano Charles Goodyear ter descoberto o método de vulcanização no século XIX, foi na Alemanha que a borracha foi sintetizada a partir do petróleo, más tarde um nome muito conhecido na indústria de pneumáticos foi quem utilizou do processo pela primeira vez, como revestimento de rodas de bicicleta, o escocês John Dunlop em 1888 preconizou o pneu (SPECHT, 2004). Segundo a SINPEC – Sindicato nacional da indústria de pneumáticos, os pneus de passeio são compostos de 27% de borracha sintética, 14% de borracha natural, 28% de negro de fumo, 17% de derivados do petróleo e produtos químicos, 10% de aço e 4% de material têxtil.

Infelizmente, a maioria dos produtos derivados de borracha pós-consumo, ainda são descartados como resíduo em aterros sanitários ou incinerados. Tais materiais levam muitos anos para se degradarem naturalmente, devido a sua composição reticulada e os aditivos usados durante a fabricação para prolongar a vida útil do produto, o que torna inaceitável o descarte deste inservível a céu aberto. Já a queima desse material como combustível, é um processo que produz gases perigosos e recupera apenas 25% da energia utilizada para o produzi-lo. (N.F. MEDINA *et al.*, 2018).

### 3.1.3 Impactos ambientais

Os pneus inservíveis não são biodegradáveis, possuem uma composição complexa e apresentam uma difícil compactação. Esses fatores são significativos para a redução da vida útil de aterros sanitários quando descartados nos mesmos (PARRA, NASCIMENTO E FERREIRA, 2010). Outro motivo pelo qual não é recomendável a disposição de pneus inservíveis em aterros sanitários devido seu formato, propício para retenção de gases. Estes gases ficam retidos em seu interior, induzindo o pneu a subir para superfície do aterro, como fosse um balão, rompendo, assim a camada de cobertura. A abertura nessa camada torna os resíduos expostos atraindo insetos, roedores e pássaros, também devido ao volume ocupado antes da movimentação, deixa enormes vazios facilitando a penetração de água e contribuindo para formação de chorume (MOTTA, 2008).

No Brasil, o descarte indiscriminado de pneus na natureza é proibido por lei, ainda assim a prática é recorrente, principalmente pelo crescimento sem planejamento de grandes centros urbanos. Pela falta de infraestrutura ou até mesmo ignorância da população, os pneumáticos são dispostos em aterros, lixões, rios, lagos e córregos, fazendo um impacto negativo ao meio ambiente, como contaminação do solo, ao liberar substâncias tóxicas. A disposição em rios e lagos provoca a diminuição da calha desses locais, como consequência ocorre enchentes, alagando vias e residências (SPREAFICO, 2012).

Outra forma de descarte dos pneus é a queima, que também é uma ameaça à contaminação do solo e aos lençóis freáticos, devido ao fato de que, os produtos químicos e metais pesados liberados pelo pneu no processo de combustão podem durar até 100 anos no meio ambiente. Notoriamente, a incineração de pneumáticos sem o devido tratamento ou filtro de gases altamente tóxicos, podem causar mortalidade prematura, prejudicar as funções pulmonares, depressão do sistema nervoso e central e problemas do coração (SOUZA, 2009).

Os pneus inservíveis descartados de forma errônea, se tornam ambientes propícios para a proliferação de mosquitos *Aedes Aegypti*, transmissor dos vírus da Dengue, Zika e Chikungunya, devido a facilidade de acumular de água provida pela chuva. Outra doença que pode ser encontrada no acúmulo de água é a Leptospirose, devido ao acúmulo de urina de ratos (TORNELLI, 2016).

De acordo com LAGARINHOS (2011) o descarte ilegal causa muitos riscos como o acúmulo desse material em aterros, poluição e enchentes provocadas por pneus inservíveis descartados em rios e córregos, o risco de incêndio e a proliferação de doenças. Legalmente, o Brasil não permite o descarte de pneus inservíveis em aterros desde 1999 pelo fato de impossibilitar a compactação e diminuir o tempo de vida dos aterros (VELOSO, 2010). Entretanto, a proibição da lei somada a falta de incentivos para reciclagem e reaproveitamento dos pneus inservíveis tornou o descarte ilegal corriqueiro.

#### 3.1.4 Importância da logística reversa

O instrumento de logística reversa pode promover a evolução da economia e social, através de procedimentos e ações com o intuito de realizar a coleta e restituir os resíduos sólidos no setor empresarial, para reciclagem e reaproveitamento, em um ciclo produtivo, ou qual quer outra disposição ambiental final correta (CONAMA, 2009). A logística reversa também é uma forma de fazer as empresas capitalizarem mais, pois o reaproveitamento de materiais e a utilização de embalagens retornáveis, trouxe uma economia animadora, fomentando ainda mais a investir e a desenvolver novas iniciativas de logística reversa (LACERDA, 2002). Como exemplo, há o caso em que borracha de pneus inservíveis, são utilizados como modificador de ligante asfáltico. Esse é o ponto de maior importância da logística reversa, a economia trazida por ela para empresas que substituem suas matérias-primas virgens, por matérias-primas recicladas, dessa forma conseguem apresentar um preço mais competitivo sem baixar a qualidade do produto (AGUIAR; FURTADO, 2010).

Ecologicamente, a logística reversa tem a importância de garantir o descarte dos resíduos sólidos da maneira correta, contribuindo para eliminar diversos passivos ambientais, aumento do tempo de uso dos aterros sanitários e minimizando a poluição causada pelos resíduos sólidos ao não retornar ao ciclo produtivo. Com isso as empresas utilizadoras da logística reversa, além de ganharem na parte financeira, também ganham na parte social com a comunidade, e na parte técnica, pois a implantação da logística reversa é um quesito fundamental na obtenção da NBR 14000 (AGUIAR; FURTADO, 2010).

## 3.2 Reciclagem de Pneus Inservíveis

Reciclar tem sido a palavra chave para minimizar o impacto sobre o meio ambiente, da geração de resíduos quanto no consumo de recursos. Um exemplo de reutilização e reciclagem pode ser os pneus, que só no Brasil são gerados cerca de 450 mil toneladas por ano. Isso é referente a 90 milhões de unidades utilizadas em veículos, que levam 600 anos para se decomporem. (SEST – SERVIÇO SOCIAL DE TRANSPORTE, 2017).

### 3.2.1. Muros de gravidade e obras de contenção

A utilização de pneus velhos para a construção de estruturas de contenção, já é uma realidade. O sistema consiste em amarrar os pneus lado a lado com arame galvanizado ou cordas, em seguida preenche-os com solo ou material pétreo. São estruturas que se assemelham ao gabão, porém, sem custo por utilizar materiais descartados (M. BARONI *et al.* 2012).

### 3.2.2. Estruturas de absorção de energia ou barreiras de inércia

Pela sua flexibilidade, os pneus são bons para amortecer impactos de acidentes em rodovias. No estado de Connecticut (EUA), por exemplo, foram feitas barreiras de inércia atenuadora de impactos de veículos construída com pneus inteiros e areia, nas Rodovias (Rout) 2 e 7. Estudos realizados sobre o dispositivo, indicou que este tipo de barreira exerce uma performance satisfatória em relação da desaceleração do veículo que a colide (LANE, 1975; BUTTON, 1977; SALINI 2000).

### 3.2.3. Controle de Erosão

Na construção de barreira de contenção para controle de erosão causada pelos ventos, enchentes e ressacas, podem ser utilizados pneus inteiros. Em lugares desérticos ou próximos de dunas de areia, barreiras feitas com esse material, podem ser empregados. A utilização de pneus inteiros no plantio de plantas de raízes grandes, podendo auxiliar na contenção da erosão do solo (SALINI, 2000).

### 3.2.4 Estabilidade de ombreiras

Os pneus inservíveis já foram empregados na estabilidade de ombreiras como gabiões, e apresentam grande vantagem econômica. O Estado da Califórnia nos Estados Unidos publicou especificações técnicas para esta solução, e para uso na proteção de taludes em canais e rios (NGUYEN et al., 1989).

O CALTRANS (Califórnia State Department of Transportation) orienta diversos cuidados no emprego de pneus inservíveis para proteção de talude. Os pneus devem ser dispostos e empilhados de tal forma que mantenham a sua forma geométrica original. Os *clips* metálicos utilizados para prender um pneu ao outro precisam ser confeccionados com barras de aço de diâmetro de 12,5 mm. O material escavado para a colocação da proteção pode ser empregado em um eventual reaterro atrás da barreira (proteção) de pneus, sendo recomendada, neste caso, a compactação através de compactadores manuais. O CALTRANS também recomenda que os pneus fiquem em locais não visíveis aos motoristas, ocultados pela vegetação e/ou pintados para ficarem mais bem dissimulados no ambiente.

### 3.2.5 Geogrelha

No estado de Minnesota nos Estados Unidos no ano de 1985, foi indicada a utilização de pneus inservíveis inteiros como um tipo de geogrelha em ambientes de solo mole, como experiência, diversas seções foram executadas. O experimento ficou em observação durante dois anos, foram constatados recalques em torno de 30 e 45 cm, considerados satisfatórios em relação ao esperado de recalques em torno de 30 e 60 cm em condições convencionais (EPPS, 1994).

### 3.2.6 Obras de drenagem

O emprego de pneus em obras de drenagem em substituição aos bueiros é uma iniciativa conhecida, os pneus são presos uns aos outros em forma de tubo para comporem módulos. Nos estados Unidos em Vermont e na Georgia, se tem relatos da aplicação dessa prática e apresentou um bom desempenho (MEMO, 1992).

### 3.2 Legislação

No ano de 1991, nos Estados Unidos, foi aprovada a lei do Ato de eficiência do transporte de superfície intermodal, nomeado de ISTE seção 1038. Declarando assim; “está é a política dos Estados Unidos para desenvolver um Sistema de transporte intermodal economicamente eficiente, ambientalmente saudável, que forneça a base para a nação competir na economia global, e irá mover pessoas e bens de maneira eficiente”. Esse ato requereu que, a partir do ano de 1994, uma parcela de 5% das estradas construídas com verba da federação, deveria utilizar asfaltos feitos com borracha fragmentada, pneus reciclados ou ligantes modificados (CAMPHDH *et al.*, 1997).

A política de gerenciamento de resíduos de pneu começou no Brasil, com a aprovação da resolução nº. 258 do CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, no dia 26 de agosto de 1999, onde se “Determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam responsáveis por coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção relativa às quantidades fabricadas e importadas”.

A resolução também deixa a cargo dessas empresas a reciclagem de metade dos pneus usados já comercializados, medida que se não executada pelos responsáveis, a impediria de continuar atuando no mercado. No ano de 2005 a relação de reciclagem de pneus era de cinco pneumáticos para cada quatro produzidos, contribuindo para redução do passivo ambiental de milhões de inservíveis. O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) é responsável pela aplicação da resolução, com o dever de fiscalizar, autuar e punir os comerciantes infratores baseado na Lei de Crimes Ambientais.

No dia 30 de setembro de 2009 foi publicada a resolução nº 416, revogando as resoluções nº 258/1999 e nº 301/2002. Com novos procedimentos de gerenciamento do resíduo de pneu, além das responsabilidades já delegadas aos fabricantes e importadores de pneus citadas nas resoluções anteriores, agora eles também teriam o dever de implantar nos municípios acima de 100.000 (cem mil) habitantes, pelo menos um posto de coleta de pneus inservíveis.

No ano de 2010 foi publicada a Lei Federal 12.305 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, estabelece diretrizes claras relacionadas à gestão e ao gerenciamento de resíduos sólidos. Segundo esta lei, existe uma ordem

de prioridades a serem atendidas, que ordena da seguinte forma: Não geração; redução; reutilização; tratamento; disposição final ambiental adequada.

### 3.3 Pavimentos Rodoviários Brasileiros

Há décadas que no Brasil o modal rodoviário tem a maior representação no transporte de pessoas e cargas, na movimentação de cargas em relação aos outros sistemas, tem uma importância de 61,1%, seguido do modal ferroviário (20,7%), o aquaviário (13,6%), o dutoviário (4,2%) e o aéreo (0,4%). Em relação a movimentação de passageiros, o modal rodoviário é também a principal alternativa, com uma participação de 95%. Para mais, responde como agente integrador da matriz de transportes, auxiliando imprescindivelmente para o crescimento socioeconômico da nação (CNT-CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES, 2016).

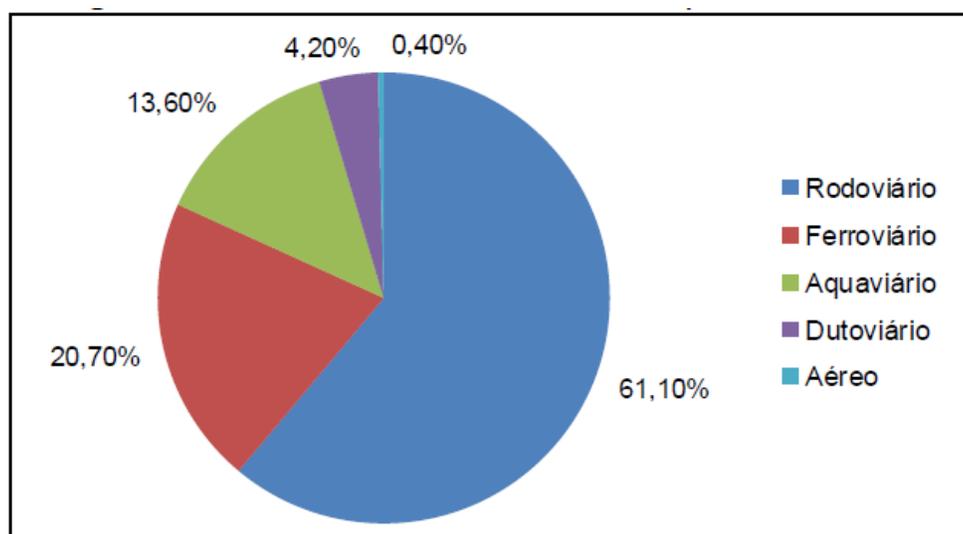


Figura 1. Distribuição da matriz de transporte no Brasil. Fonte: (CNT, 2016).

Mesmo sendo a principal alternativa de modal para movimentação no Brasil, com o crescimento constante da frota de veículos no país, somada ao estado desvantajoso da malha rodoviária, o modal não consegue acompanhar o respectivo crescimento. Na última década o número de veículos em circulação aumentou 110,4% no país e as rodovias apenas 11,7%. A conclusão, de que não é satisfatório o estado de conservação das rodovias, se agrava com o aumento da carga, ou tensões, nas estradas, atrelado à falta de incentivo financeiro em restauração, manutenção e/ou conservação necessários, tem cada vez mais contribuído para

degradação da malha rodoviária brasileira. Uma Pesquisa de Rodovias dirigida pela Confederação Nacional de Transportes avaliou a malha rodoviária de responsabilidade federal e estadual. O resultado da pesquisa acusou que 67,1% de das rodovias no Brasil demonstram alguma deficiência, elas foram classificadas como regular ruim e péssima (CNT, 2016).

<b>Estado geral</b>	<b>Extensão avaliada (km)</b>	<b>Percentual (%)</b>
<b>Ótimo</b>	4.124	5,0
<b>Bom</b>	23.186	27,9
<b>Regular</b>	31.848	38,2
<b>Ruim</b>	17.580	21,1
<b>Péssimo</b>	6.485	7,8
<b>Totais</b>	<b>83.223</b>	<b>100,0</b>

Tabela 1. Classificação da malha rodoviária no Brasil. Fonte (CNT, 2016).

A falta de conservação das rodovias no território brasileiro, proveniente do alto custo acarreta em aumento da manutenção dos veículos, nas avarias com pneus, aumento do consumo de combustível, elevado índice do risco de roubo de carga e alto número de acidentes. Em consequência, a velocidade permitida nas rodovias é ponderada, os custos dos produtos tornam-se altíssimos para população, a quantidade de peso de carga é limitada e ainda é extremamente prejudicial ao meio-ambiente. (CNT, 2018).

### **3.4 Utilização de Borracha de Pneus em Misturas Asfálticas**

#### **3.4.1 Histórico**

Segundo State of *California Department of transportation – Caltrans (2003)*, a utilização de borracha em misturas asfálticas, em execução de pavimentação, tem primeira data em 1930, quando tinha a principal finalidade de selar trincas no pavimento, em serviços de reparo e conservação. Dois engenheiros *Lewis e Welborn*, do *Bureau of Public Rosds (BPR)*, NOSA Estados Unidos, desenvolver um programa laboratorial com a intenção de estudar as propriedades causadas por 14 tipos de borracha em três diferentes ligantes asfálticos. Durante a pesquisa também se avaliou o emprego de borracha moída de pneus em misturas asfálticas. Através

deste experimento que foi instigado a curiosidade na modificação de misturas betuminosas por borracha, também como as patentes da metodologia de modificação.

Nos Estados unidos se considera como inventor da técnica moderna de modificação de asfalto por borracha através da via úmido, *Charles Mcdonald*. Engenheiro do *Bureau of Public Roads*, após sua aposentadoria, em meados da década de 1960, desenvolveu trabalhos no Estado do Arizona, sobre revestimentos asfálticos que apresentassem flexibilidade adequada a temperatura ambiente. Através dos seus experimentos identificou que, a adição de borracha líquida ao asfalto seria fácil, porém, com custos elevados e a adição de borracha sólida vulcanizada demandaria elevadas temperaturas do asfalto, superiores a 260°C para obter uma mistura coesa. Entretanto, o pesquisador observou que ao aquecer o asfalto junto com a borracha, em baixas temperaturas, acontecia certa reação. Então concluiu que a borracha moída de pneus inservíveis era um material com boas características elásticas e baixo custo. O Engenheiro Mcdonald realizou inúmeros ensaios com a intenção de avaliar os efeitos da porcentagem e do tipo da borracha, o tempo e a temperatura de mistura, presenciou misturas betuminosas modificadas com ótimas características, quando aquecidas e temperaturas elevadas (WAY, 1999).

As primeiras especificações elaboradas por Macdonald foram empíricas e simplificadas com a execução de atividades de manutenção e conservação em regiões de climas diferentes do Estado do Arizona. Os resultados dos ensaios indicam que para atingir viscosidade e elasticidade satisfatórias, há a necessidade de adicionar no mínimo 15% de borracha no ligante asfáltico, com teores ideais de 20 a 25%. Também preconizou a temperatura de 177°C e o tempo de mistura superior a 45 minutos para otimizar a produção (WAY, 2009). O processo nomeado de “via úmida” foi patenteado em 1978 pelo pesquisador. Na mesma época se anunciou pela *Arizona Refining Company* outra patente, ambas expiraram em 1995, ainda assim continuam com o título de metodologias de maior popularidade para Asfalto-Borracha (CPR, 2017).

Em paralelo as pesquisas e descobertas de Mcdonald no Arizona, na Suécia é apresentado processo denominado *Rubit*. Processo que chegou aos Estados Unidos através da empresa *Pavetech e Bellevue*, de Washington e lá renomeado como *Plus Ride*. Desenvolviam-se tecnologias para utilização de borracha no ligante

asfáltico (processo úmido) e diretamente no CBUQ (processo seco) (SPECHT, 2004).

Nas décadas de 1970 e 1980, o Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans) executou inúmeras aplicações do ligante modificado por borracha como restauração de pavimentos deteriorados. A técnica de pavimentação utilizada concretizava camadas de pavimento esbelto, chamada de *Chip Seal* e as misturas betuminosas com características densas, geralmente empregadas para reforço estrutural, também empregaram a borracha em misturas asfálticas descontínuas (*open graded, gap graded*) utilizada com a finalidade de realizar camadas intermediárias para evitar a reflexão de trincas (CALTRANS, 2003).

No início de 1990, aproximadamente 30 estados americanos realizaram estudos em conjunto com a *Bureau Public Roads* e o Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE). No ano de 1992 expirou a patente que inibia a execução desta tecnologia em larga escala, se fazendo da tecnologia do Asfalto-Borracha de domínio público. Depois que a ISTEIA (*Intermodal Surface Transportation Efficiency Act*) exigiu um percentual de borracha incorporada ao asfalto, foi que em 1991 diversos estados americanos começaram estudos e executaram pavimentos com borracha inservível (SPECHT, 2004)

A Caltrans realizou uma média de 100 projetos com a técnica de Asfalto-Borracha até meados da década de 1990. O acompanhamento dessas obras identificou um bom comportamento das misturas modificadas, revelando um projeto e construção apropriados. No começo do século XXI, as aplicações de Asfalto-borracha se tornaram mais incrementadas no Estado da Califórnia, em 2010 aproximadamente 31% dos pavimentos desse estado apresentavam o método de modificação (CPR, 2017)

No continente europeu, o Asfalto-Borracha é utilizado desde a década de 1980, na Bélgica, França, Áustria, Holanda, Polônia Alemanha, Grécia e Reino Unido, em resalta estão os países de Portugal, Espanha, Itália República Checa e Suécia (LO PRESTI, 2013).

Desde o ano de 2007 na Suécia a *Swedish Transport Administration (STA)*, tem executado 15 projetos com o emprego da técnica do Asfalto-borracha, somando mais de 100 km de estradas, com a intenção principal de reduzir os ruídos nas rodovias próximas a centros urbanos (SANDBERG, 2010).

Nas décadas de 1970 e 1980 os países Austrália e África do Sul iniciaram a produção de Asfalto-Borracha para pavimentos e para selar trincas. No Sul do continente africano se utiliza dos dois processos de inserção de borracha, “via seca” e “via úmida” com êxito, mas predomina o processo da “via úmida”. Os Estados de *New South Wales* e *Victoria*, na Austrália, adotaram o processo da “via úmida”, para a construção de camadas de pavimento resistentes a trincas por deflexão (LO PRESTI, 2013).

A primeira execução de um pavimento rodoviário utilizando Asfalto-Borracha “via úmida” no Brasil, ocorreu em agosto de 2001 no Estado do Rio Grande do Sul na Rodovia BR-116/RS. Fala-se de um trecho de dois quilômetros (entre os quilômetros 318 e 320), próximo a cidade de Guaíba (região metropolitana de Porto Alegre), (SPECHT, 2004) Após quase 18 anos da primeira aplicação, um número significativo de trechos rodoviários, foram construídos, recuperados ou restaurados utilizando o processo por “via úmida”, muitos trechos executados com sucesso, mas tanto outros com inexperiência. Desde então se tem realizado estudos pelos centros de pesquisa nas Universidades Brasileiras com o objetivo de dominar a técnica (ODA, 2000; BERTOLLO, 2002; SPECHT, 2004; MORILHA, 2004; FAXINA, 2002, 2006; PILATI, 2008; BELAGUER, 2012; CAMARGO, 2016).

### **3.5 Processos de Incorporação de Borracha em Pavimentos Asfálticos**

#### **3.5.1 Processo seco**

O processo de incorporação de pó de borracha reciclada de pneu diretamente em concreto asfáltico usinado a quente tem como característica a utilização do resíduo como aditivo ao agregado pétreo. Neste método, adicionam-se partículas sólidas de borracha, com a intenção de substituir no máximo 5% do agregado mineral. Frequentemente é utilizada uma granulometria de misturas convencionais, porém a temperatura de mistura é mais elevada entre (160-188°C) e na compactação realizada a temperaturas entre 148-160°C. Existe interação entre o ligante e a borracha, mas quando comparado ao processo úmido é muito reduzida. Os inibidores de raios ultravioletas e os antioxidantes presentes na borracha não são transmitidos para o asfalto, devido a isto que há uma preferência pelo processo úmido. Na literatura existem duas nomenclaturas para o produto divergente desse

processo, *rubber-aggregate* ou então *rubber modified hot mix asphalt* (HEITZMAN, 1992; EPPS, 1994).

De acordo com SHEN *et al.*, (2014), atualmente existem três métodos para aplicação deste processo na confecção de Asfalto modificado: o *PlusRide Technology*, o *Generic Sistem* e o *Chunk Rubber*.

*PlusRide Technology*, uma metodologia patenteada em 1950, orienta a dição de borracha diretamente no misturador da usina de asfalto, simultaneamente os agregados minerais, mistura-se os materiais a seco e então se adiciona o ligante asfáltico. O teor de borracha granulada empregada a mistura asfáltica consiste em 1 a 3%. O diâmetro das partículas de borracha pode variar entre 2,0mm até 4,2mm. O volume de vazios esperado nessa mistura enquadra-se entre 2,0 a 4,0%, conseqüentemente o teor de ligante asfáltico apresenta-se entre 7,5 a 9,0%. A granulometria recomendada é a descontínua, com o propósito de melhorar a estabilidade (SHEN *et al.*, 2014)

Genérica (*Generic Sistem*), também conhecido como TAK, método desenvolvido entre o final da década de 1890 e o início da década de 1990. A adição de borracha é proporcionalmente a 3% em peso em relação ao peso total do composto asfáltico. A granulometria dos fragmentos de borracha caracteriza-se pelo diâmetro entre 0,18mm e 2,0mm, proporcionando a modificação secundária do ligante asfáltico. São duas as granulometrias indicadas no método, são elas densas ou descontínuas do tipo *gap graded* (SHEN *et al.*, 2014).

*Chunk Rubber*, método preconizado pelo Corpo de Engenheiros do exército dos Estado Unidos e o Laboratório de Pesquisa de Engenharia de Região Fria (CRREL), entre as décadas de 1970 e 1980. Com a intenção de estudar e avaliar as características de desagregação em misturas asfálticas devido às baixas temperaturas de congelamento. Sugere-se um diâmetro para as partículas de borracha entres 4,75mm e 9,5mm, uma granulometria para mistura asfáltica ajustada aonde haja espaço suficiente para os fragmentos de borracha (SHEN *et al.*, 2014).

### **3.5.1.1 Características da granulometria da borracha**

No processo “via seca” é importante a cautela com a granulometria correta das partículas de borracha, pois os métodos indicam faixas granulares ideais para a produção da mistura modificada. Essas granulometrias são apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3.

Peneira (mm)	Porcentagem que passante (%)		
	PlusRide 8	PlusRide 12	PlusRide 16
19	-	100	100
9,5	100	60-80	50-62
6,3	60-80	30-44	30-44
1,70	23-38	19-32	19-32
0,600	15-27	13-25	12-23
0,075	08-12	08-12	07-11

Tabela 1 Faixas granulométricas específicas para tecnologia PlusRide. FONTE: HASSAN (2012).

Peneira (mm)	Porcentagem que passante (%)		
	Genérica 9,5	Genérica 12,5	Genérica 19
25	-	-	100
19	-	100	90-100
12,5	100	90-100	-
9,50	90-100	-	56-80
4,750	55-85	44-74	35-65
2,3600	32-67	28-58	23-49
0,300	7-23	5-21	5-19
0,075	2-10	2-10	2-8

Tabela 2 - Faixas granulométricas específicas para tecnologia Genérica. FONTE: HASSAN (2012).

### **3.5.1.2 Dosagem de misturas asfálticas modificadas pela via seca**

Para realizar a dosagem da mistura asfáltica modificada com borracha através do processo via seca tem-se recorrido à metodologia Marshall com sucesso, para fixas granulométricas densas. Entretanto, o desejo nesta mistura não é encontrar a estabilidade, mas sim desenvolver uma mistura asfáltica com volume de vazios entre 2,0 e 4,0%. Recorrentemente se emprega porcentagens mais altas do preconizado, com o objetivo de compensar as mudanças volumétricas causada na mistura asfáltica, devido à incorporação da borracha que apresenta um baixo peso específico (FHWA 2016).

Na dosagem em laboratório, os fragmentos de borracha granulada são entendidos como um agregado, misturando-se. Após pré-aquecer com os agregados minerais e em seguida se adiciona o ligante asfáltico. Deve-se conservar a mistura solta durante uma hora antes da compactação. Durante esse período acontece a reação parcial do ligante com a borracha (CPR, 2017).

Após passar o período de estocagem na condição solta, a mistura asfáltica é compactada nos corpos de prova de forma convencional e resfriados a temperatura ambiente, para em seguida avaliar e determinar o volume de vazios. Como resultado os teores de ligante projetados tem tendência de serem de 10 a 20% maiores, comparados misturas convencionais. Mesmo considerando o volume de vazios como critério de projeto, devemos ressaltar que os valores indicados como estabilidade e fluência tendem a serem inferiores aos comumente apresentados em misturas asfálticas convencional (FHWA, 2016).

### 3.5.2 Processo úmido

O ligante denominado Asfalto-Borracha tem origem no processo úmido, definido como uma mistura de cimento asfáltico, borracha de pneu reciclada e certos aditivos, dos quais o percentual de borracha deve ser pelo menos 15% em massa total do cimento asfáltico, onde aconteça uma reação com o ligante asfáltico de forma a causar inchamento das partículas de borracha (ASTM, 1997).

No processo pela via úmida se reaproveita partículas finas de borracha de pneu, que são misturadas ao CAP, ligante asfáltico aquecido, produzindo o ligante modificado. Como citado anteriormente, essa tecnologia se atribuiu muitas vezes à pesquisa desenvolvida por Charles Mcdonald, que desenvolveu estudos sobre o beneficiamento das propriedades de elasticidade e viscosidade do ligante modificado elevado a temperaturas entre (180 – 218C°), proporcionando uma envolvente camada pelicular espessa nos agregados, onde não exista a possibilidade do ligante asfáltico escorrer, como ocorrer exsudação no revestimento (CPR, 2017).

Os materiais poliméricos apresentam alto peso molecular, são o caso das borrachas, polímeros hidrofóbicos, que quando imersos em matérias com peso molecular baixo tendem a apresentar uma variação de volume. Essa variação de volume no caso das borrachas se reflete em um aumento em média de cinco vezes

seu tamanho, por absorver através das cadeias de polímeros os óleos aromáticos contidos no cimento asfáltico, proporcionando-o uma maior ductilidade, viscosidade e menor suscetibilidade térmica (LI P. *et al*, 2017). Como consequência, há a transferência para o asfalto, através do Negro de Carbono - N330 (ou como mais conhecido Negro de Fumo), de propriedades químicas das borrachas vulcanizadas, como inibidores de raios ultravioleta e antioxidantes, resultando em um insumo com maior resistência ao envelhecimento e a formação de fissuras, aumentando a durabilidade do pavimento asfáltico (RATTANASOM *et al.*, 2007; LIU *et al.*, 2008).

O fenômeno de inchamento da borracha, às vezes confundido com uma reação química é na verdade uma difusão, pois as borrachas vulcanizadas não dispõem de elétrons livres na última camada para que aconteça uma ligação iônica, portanto, uma interação química com asfalto, nesse caso, não seria possível. O que ocorre é a transição de líquidos até o lado interno do polímero. Quando imergida a borracha em meio oleoso, se concentra em sua superfície uma alta concentração de líquidos. Ao decorrer de um período, este líquido, ora na superfície, penetra no interior da partícula, sendo essa difusão gerenciada pela compatibilidade molecular entre a borracha e o líquido, o período de imersão e a característica viscosa do líquido. Uma degradação do polímero por estar em meio oleoso, é evitada devido as fortes atrações moleculares nas suas cadeias. No entanto, se permanecer um longo período exposta e em condições favoráveis, ocorre à deterioração. (LI P. *et al*, 2017).

Formado por quatro fragmentos químicos: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos (SARA), as três primeiras frações do asfalto são constituintes da porção maltênica e a porção restante denomina-se asfaltênica. Os saturados e aromáticos têm função de plastificantes das frações de resina e asfaltenos. Através da variação entre estas frações resultam-se diferentes composições químicas de asfalto. É de suma importância a proporcionalidade entre os teores de cada fração para a estabilidade coloidal do betume, pois é através do teor das frações químicas (SARA) que a instabilidade coloidal (Ic) do asfalto é calculada, tornando possível a noção da compatibilidade desse ligante com poliméricos. Ainda que a composição química do ligante controle a proporção de inchamento, a viscosidade do líquido e a velocidade, a proporção de inchamento cresce com o decréscimo da viscosidade do líquido. Observando essa correlação se compreende um aumento da velocidade de inchamento ao modificar com borracha, asfaltos com alta penetração comparada ao

estado “cru”. A interação de polímeros com asfaltos de fração maltênica maior é mais positiva que em outros casos (GUO F., 2020).

O inchamento das partículas de borracha pode ser inibido pela presença de uma carga mineral. Também como uma quantidade superior de Carbono Negro ocasiona em uma redução contínua no aumento do volume, consequência do inchamento no polímero (NEWCOMB *et al.*, 1994; EPPS, 1997).

O resultado da mistura de ligante asfáltico com fragmentos finos de borrachas é um líquido médio, onde as partículas se distribuem aleatoriamente, ficando de forma suspensa. Na avaliação desse estado de suspensão das partículas são considerados diversos fatores, como concentração de partículas sólidas, forma, orientação, interação e distribuição granulométrica. A mudança de viscosidade do material a partir da adição de partículas, ocorre pertinentemente a uma energia extra dissipada relacionada ao delineamento da velocidade do fluido ao redor da esfera. Caso a borracha adicionada ao um asfalto para modificação do ligante, não for compatível com o cimento asfáltico, resultara em um ligante modificado com uma viscosidade considerada demasiada para o desejado (NEWCOMB *et al.*, 1994).

### 3.5.3. Sistemas de processo por via úmida

O interveniente da utilização em larga escala, dos asfaltos que são modificados por outros polímeros como SBS e EVA, dos ligantes modificados com borracha de pneus moídas é a estabilidade. As misturas preparadas em planta ou terminais, como é o caso das mesmas com os polímeros citados por primeiro, o produto resultante do processo pode ser estocado e entregue na obra. Comumente, o processo do ligante modificado com borracha de pneus inservíveis é *just in time*, sistema intitulado *Continuous Blending*, ou seja, preparado no canteiro de obras e utilizada para executar o pavimento imediatamente. Entretanto, diferentemente de outros países, no Brasil o habitual é utilizar o processo úmido através do sistema *Terminal Blending*, processando a mistura em um terminal central e transportando até o local da execução.

#### **3.5.3.1 Terminal Blending**

*Terminal Blending* é um sistema de variação do processo úmido, tem similaridade com o processo comumente utilizado para a fabricação de ligante

asfáltico modificado por polímeros como SBS e EVA. Desenvolvido na década de 1980, o número de pesquisas desenvolvidas mundialmente é menor quando comparado com o sistema *Continuous Blending*, utilizado desde a década de 1960 (SATUCCI, 2009).

Neste sistema a mistura modificada com borracha de pneus inservíveis em partículas finas passantes na peneira nº 40 (0,42mm), é produzida em terminais de distribuição, onde após o seu preparo são transportados até a obra, podendo um único terminal atender diversas obras em grandes distâncias. O sistema se caracteriza pela modificação física, reológica e química do ligante, ocorrer através da fusão entre os componentes, via agitação mecânica e digestão térmica em moinhos de cisalhamento. Resultando em um insumo uniforme e estável, onde não ocorre exsudação dos componentes, também não necessita de constante agitação, pois o sistema permite distribuir de forma uniforme as partículas de borracha no ligante. Os benefícios já citados fazem com que o produto possa ser armazenado por longo espaço de tempo (CALTRANS, 2005).

Pelo fato da mistura ser processada em temperatura entre 180 – 218C° por agitação e cisalhamento, ocorre a despolimerização e a desvulcanização da borracha moída do pneu inservível, permitindo uma maior interação entre ligante e borracha, e promovendo um composto final com menor viscosidade (ROBERTS *et al.*, 1996).

Pode-se utilizar o Asfalto-Borracha proveniente deste sistema, em função das suas características, em diversas técnicas e em misturas asfálticas com diferentes faixas granulométricas como *open graded*, *gap graded* e *dense graded*. Os teores de borracha variam entre 15%, indicado para a produção de CBUQ com faixa granulométrica densa contínua, e 20% recomendado para misturas asfálticas descontínuas com variáveis teores de vazios. Ainda que este sistema possibilite que, o produto asfáltico fique armazenado por um longo período de tempo, na utilização do asfalto na usina, deve-se adaptação os tanques com agitadores, podendo-se estoca-lo por até três semanas, com a execução de agitações diárias em períodos (MORILHA E GRACA, 2003).

Na Figura 1 está apresenta-se o esquema de produção pelo sistema *Terminal Blanding*, nela consegue-se verificar o processo desde a coleta de pneus, passando pelo processo de moagem, adição da borracha no ligante asfáltico, período de

mistura para a formação do asfalto-borracha, preparação e adição dos agregados para produção do CBUQ modificado e por fim o transporte até a obra desejado.

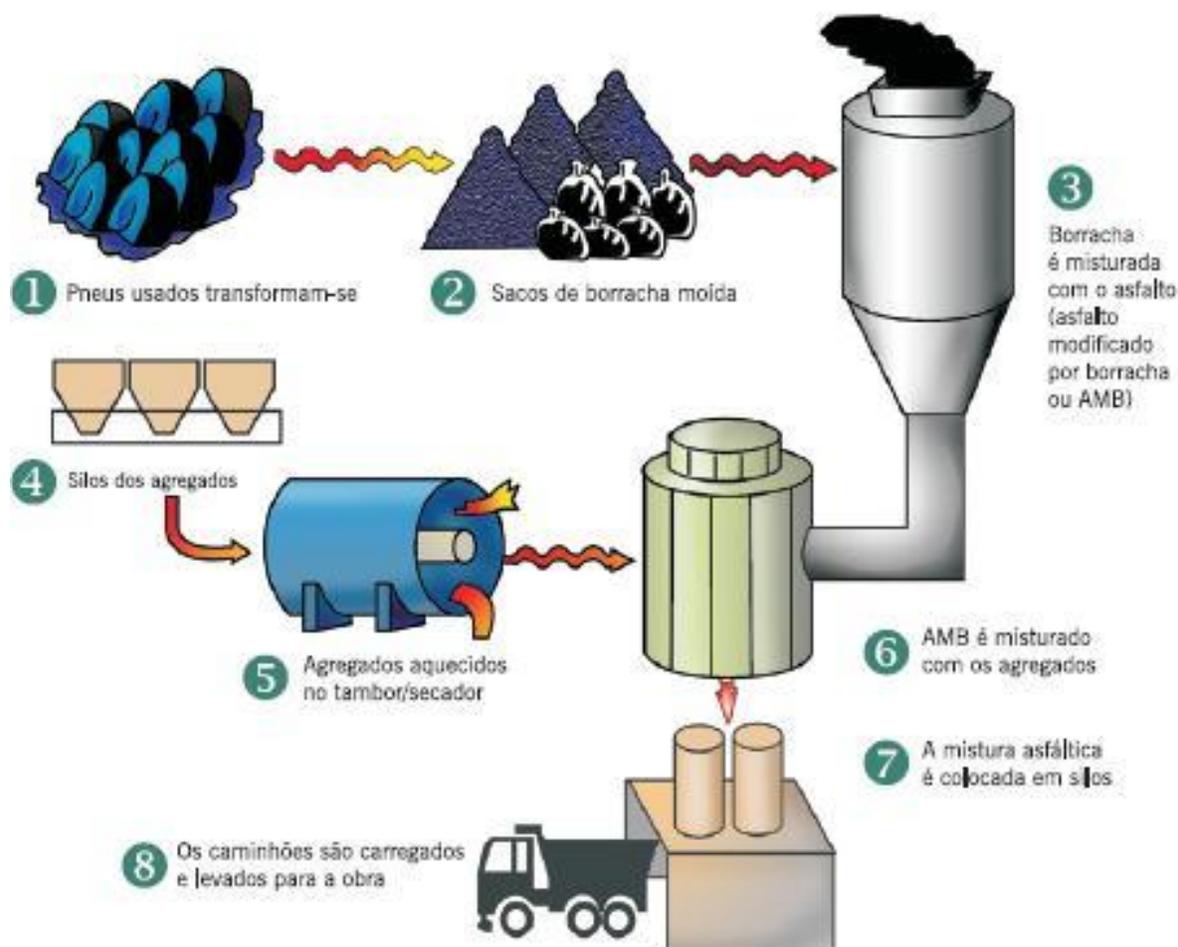


Figura 1 – Esquema de fabricação do Asfalto-Borracha pela via úmida pelo sistema estocável (*Terminal Blending*), Fonte: (PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA, 2010).

### 3.5.3.2 *Continuous Blending*

O sistema *Continuous Blending* é o precursor do processo por via úmida, onde a borracha de pneus inservíveis é triturada e adicionada ao ligante asfáltico aquecido, resultando em um ligante modificado nomeado de Asfalto-Borracha (*Asphalt Rubber*) ou Asfalto Emborrachado (*Rubberized Asphalt*). Pelo fato de sua produção ser *in loco*, ou seja, na obra por equipamentos específicos para produzir a mistura, também recebe a nomenclatura de *Field Blend* (BANDINI, 2011). Deve-se preparar o ligante modificado, adicionar aos agregados e executar em seguida o pavimento, devido à falta de estabilidade da mistura. Pelo fato de ter uma execução imediata, o sistema recebe também o título de Sistema não estocável, pois se

recomenda a estocagem no tempo entre 16 e 24 horas após a sua confecção (ROBERTS *et al.*, 1989; ASPHALT ACADEMY, 2007).

No processo de mistura contínua em usina, o teor mínimo recomendado de borracha moída de pneus inservíveis, é de 15% em relação ao peso total do ligante. Reação desejada quando adicionado à borracha no ligante, é o inchamento e amolecimento dos fragmentos do polímero. A viscosidade rotacional do composto chega a ultrapassar 1500cp a 190°C após acontecer à reação, conseqüentemente o ligante modificado necessita de agitação, para manter as partículas de borracha em suspensão e distribuídas uniformemente quando armazenado no tanque. No final do processo as propriedades reológicas apresentadas pelo Asfalto-Borracha se diferem do ligante convencional. A interação que ocorre entre o cimento asfáltico e a borracha moída de pneus são classificadas como reação. Alguns são os fatores que a modificação do ligante depende para acontecer, como exemplo: Granulometria e textura da borracha; Proporção de ligante asfáltico; Proporção de borracha; Tempo de reação; Temperatura de reação; Energia mecânica durante a mistura, Compatibilidade entre ligante asfáltico e borracha (polaridade); Uso de aditivos (óleos extensores) (BANDINI, 2011). A granulometria da borracha é relevante em relação às propriedades adquiridas pelo ligante modificado, partículas de maior espessura como passantes na peneira N° 40 (0,42mm) resultam em um produto final com maior viscosidade, enquanto partículas mais finas passantes na peneira n° 50 (0,297mm) resultam em uma mistura que terá um menor tempo de digestão (CALTRANS, 2005).

Entre os benefícios do produto resultado deste sistema está: espessura menor da camada de pavimentação; redução da reflexão de trincas; aumento da durabilidade do pavimento; presença de inibidores de raios ultravioleta e antioxidantes; menor suscetibilidade térmica; aumento da aderência entre pneu e asfalto e redução dos ruídos do trafego (SANTUCCI, 2009).

Na Figura 2 está esquematizando a interveniência de fatores existentes no sistema de usina contínua, para produção de Asfalto-Borracha pelo processo da via úmida.

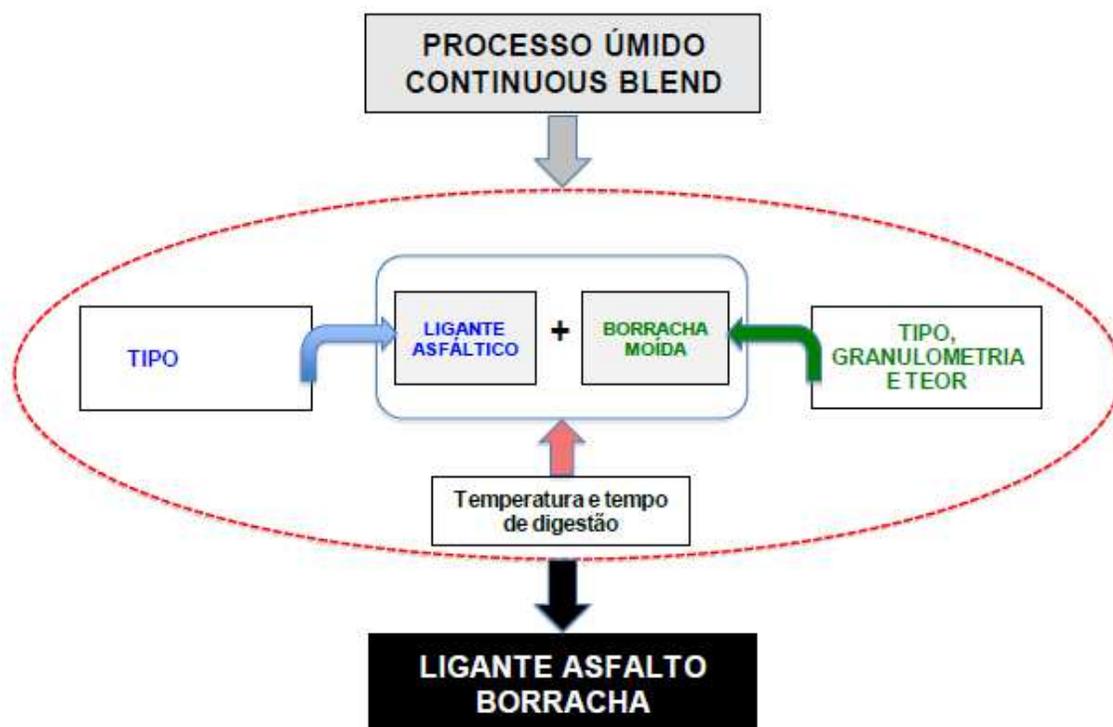


Figura 2 – Esquema de fatores intervenientes do Sistema *Continuous Blending*.

O Sistema *Continuous Blending* requer equipamentos especiais aos comumente utilizados nas usinas, para a fabricação de misturas betuminosas, como tanque de mistura e digestão do asfalto borracha, central de controle de temperatura, tempo de digestão e agitação do ligante. Na Figura 3 é apresentada toda a sequência do sistema.



Figura 3 – Esquema de fabricação do Asfalto-Borracha pela via úmida pelo sistema não estocável (*Continuous Blending*) (CALTRANS, 2005).

### 3.6 CARACTERÍSTICAS DO ASFALTO-BORRACHA

A adição de borracha em cimentos asfálticos causa diversas alterações nas características do produto final. Os ensaios de penetração e ponto de amolecimento como outros ensaios tradicionais, têm sido utilizados para sua caracterização. A reologia é o estudo da deformabilidade dos materiais ao serem submetidos a uma carga, considerando o tempo de aplicação da mesma. No caso desse material, deve-se considerar a temperatura levando em conta o material ser termo-sensível, pois a uma variação na consistência que chama a atenção, com a mudança de temperatura. Para caracterizar seu comportamento em serviço, estuda-se a reologia dos cimentos asfálticos para uma amplitude de temperatura de  $-28^{\circ}\text{C}$  a temperaturas superiores a  $60^{\circ}\text{C}$ . Entende-se que o comportamento elástico, viscoelástico e viscoso do ligante asfáltico decorrem em função da temperatura e do período de aplicação da carga. Ainda assim, para avaliação do desempenho desse material é possível abrir mão da análise reológica. (SPECHT, 2004; CPR 2017).

No Brasil, classifica-se os asfaltos pelo ensaio de penetração, em 1/10mm como CAP 30/45, 50/70 e 85/100. Os cimentos asfálticos são exemplos de fluidos

não newtonianos, mais especificamente apresentam linearidade na relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento. Esse tipo de fluido possui viscosidade e taxa de cisalhamento dependente entre si, desta forma a viscosidade ensaiada para determinada taxa de cisalhamento será diferente em relação ao ensaio da outra. Podemos ver como exemplo os asfaltos modificados por polímeros e o Asfalto-Borracha (SPECHT, 2004).

### 3.6.1 Fenômeno de interação

Ao descrever o material que será modificado, o ligante asfáltico, começamos a entender melhor a natureza do produto final. O CAP é basicamente composto por 8 – 11% de Hidrogênio, 82 – 86% de carbono, 0 – 2% de oxigênio e 0 – 6% de enxofre, possuem uma quantidade baixa de nitrogênio, vanádio, níquel e ferro. E ainda uma complexa mistura de moléculas parafínicas, naftênicos e aromáticos. Existem ao redor do mundo aproximadamente 1.500 fontes de petróleo, e somente algumas delas tem qualidade para resultar um produto apropriado para produção de ligante asfáltico (READ E WHITEOAK, 2003).

Como já abordado anteriormente nessa pesquisa, os componentes químicos do ligante asfáltico formam uma estrutura representativa chamada SARA (saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos). A compreensão polar das resinas proporciona ao asfalto propriedades adesivas e dúcteis, além de funcionar como agentes de dispersão dos asfaltenos. Ainda as propriedades visco-elásticas dos asfaltenos sofrem influência da proporção entre asfaltenos e maltenos (LEITE, 1999; NAVARRO et al., 2002). A ordem de S < A < R < A (saturados < aromáticos < resinas < asfaltenos) contém a complexidade, o conteúdo de heteroátomos, aromáticos e incremento de peso molecular. Estudos indicam que há uma grande relação de dependência entre o comportamento reológico dos asfaltos e às proporções dos componentes, como exemplo, asfaltos com alta relação asfaleno/resina possuem uma rede estrutural rígida e elástica, onde o ângulo de fase é baixo e o módulo cisalhante complexo é elevado, por outro lado, asfaltos com altas relações de resina/asfaltenos possuem um comportamento mais viscoso, com baixa penetração e alto ponto de amolecimento (LOEBER et al., 1998).

As resinas possuem peso molecular intermediário e são uma fração semissólida composta por anéis aromáticos e cadeias laterais, e ainda são

moléculas polares que ajudam a evitar que ocorra coagulação das moléculas de asfalto. Os óleos não polares possuem peso molecular baixo, alta proporção de cadeias em comparação ao número de anéis. Os asfaltenos compõem a maioria do asfalto, por sua vez as resinas proporcionam adesividade e ductilidade e os óleos influenciam nas propriedades viscosas. (MASHAAN et al., 2013). Conforme a microestrutura e o sistema coloidal, em meio de uma matriz oleosa de maltenos os asfaltenos são difusos, envoltos por resinas de espessura variável devido a temperatura no momento da análise (NAVARRO et al, 2009).

Outra propriedade importante do asfalto é sua polaridade, que rege à orientação independente das moléculas ao se posicionar no sistema. A polaridade se incrementa com a oxidação e o envelhecimento do ligante asfáltico, e ainda os elementos heteroátomos, nitrogênio, enxofre, oxigênio e metais, são dependentes dessa propriedade (ROBERTSON, 1991).

De acordo com Jensen e Abdelrahman (2006), a efetiva modificação do ligante asfáltico pela adição da borracha, é consequência da distribuição das partículas de polímero em nível de dissolução molecular, e também do nível de interação entre o asfalto e a borracha. O tempo de digestão durante o processo de produção do Asfalto-Borracha interfere diretamente na dispersão das partículas de borracha, sendo elas vulcanizadas ou não, durante esse período ocorrendo da forma desejada as variáveis citadas, se têm a alteração das propriedades do ligante asfáltico. Mais especificamente podemos dividir em três momentos a interação entre o asfalto e a borracha:

- I. Estágio inicial, no momento em que a borracha é adicionada ao ligante.
- II. Estágio intermediário, durante o armazenamento quando o ligante modificado é mantido a altas temperaturas por certo período de tempo.
- III. Estágio prolongado, longo período de tempo que se deixe o ligante modificado estocado, antes do preparo de CBUQ

Ainda dentro dos três estágios citados, podem-se observar dois mecanismos de interação que interferem nas propriedades do Asfalto-Borracha durante a sua produção, classificando-os como inchamento das partículas e degradação motivada pela desvulcanização e despolimerização. A configuração e o nível que esses processos prosperam, dependem da relação entre tempo e temperatura durante a digestão na produção do ligante modificado (ABDELRAHMAN e CARPENTER, 1999).

A reação de inchamento, conseqüentemente a expansão e aumento de volume das partículas de borracha, é causada pela absorção dos componentes leves do ligante pelo polímero. Não se configura essa reação como uma reação química, mas sim reação de absorção dos óleos aromáticos do ligante asfáltico pelas cadeias das partículas de borracha (HEITZMAN, 1992).

A absorção pelas partículas de borracha das frações mais leves do cimento asfáltico, ocasiona enrijecimento do ligante asfáltico residual. O inchamento causa o aumento de volume das partículas, diminuindo o teor de vazios entre elas. Geralmente o Asfalto-Borracha produzido com partículas de borracha fina, têm grau de interação maior, entretanto esse fenômeno também depende das características do cimento asfáltico original (SHEN et al., 2009). Na pesquisa de Miknis e Michon (1998), foi investigada a interação entre asfalto e borracha através de ressonância magnética nuclear por meio de imagem, foi observada a expansão e dissolução das partículas de borracha no asfalto, constatando-se que o grau de expansão ocorrido é dependente das moléculas do asfalto.

Na literatura existem pesquisas que investigaram a adição de óleos extensores na formulação do Asfalto-Borracha, com o objetivo de facilitar a incorporação da borracha ao cimento asfáltico. Nesta configuração a borracha reagiria com os óleos aromáticos do aditivo, preservando a natureza química original do ligante asfáltico. O produto final desta formulação apresenta viscosidades menores que o habitual para o Asfalto-Borracha, possibilitando à execução de camada de pavimento em temperaturas próximas as utilizadas na execução com ligante convencional (FAXINA, 2002). A Caltrans (2011), disponibiliza a recomendação da adição de modificadores hidrocarbonados para o Asfalto-Borracha, em teores entre 2 e 6%, em ligantes modificados de alta viscosidade, superior a 1500cp.

Os fenômenos de despolimerização e desvulcanização reduzem o peso molecular das moléculas do ligante modificado, devido à transferência de massa ocorrida na reação entre o asfalto e a borracha (ZANZOTTO E KENNEPOHL, 1996). Estudos mostram que 85% das partículas de borracha adicionadas continuam insolúveis no cimento asfáltico, tornando dependente dos componentes solúveis e insolúveis de borracha moída, o comportamento reológico do Asfalto-Borracha. Diferentemente dos ligantes modificados por outros tipos de polímeros, que se

fundem proporcionando um material homogêneo, o ligante modificado com borracha de pneus proporciona um material heterogêneo (NAVARRO, 2004).

### 3.6.2 Fatores que influenciam o comportamento do Asfalto-Borracha

Ainda que existam normas de muitos órgãos em relação à produção do ligante Asfalto-Borracha, não se têm fórmulas prontas definindo o tipo de ligante asfáltico a ser utilizada, a quantidade e granulometria exatas de borracha, a ser adicionada, ou da temperatura e tempo de reação da mistura. Todas estas variáveis que influenciam na interação do ligante modificado com borracha de pneus inservíveis, podem ser divididas em dois grupos. O primeiro é das propriedades dos materiais utilizados e o segundo dos processos utilizados na modificação do asfalto borracha.

Começando pelo primeiro grupo, podem-se citar alguns estudos que determinam a influência significativa do tipo de ligante convencional nas propriedades do Asfalto-Borracha. O nível de frações leves presentes no cimento asfáltico influencia na interação do ligante com a borracha, sendo mais adequados para produção do modificado por borracha de pneus, ligantes com menor consistência (BOULDING et al., 1990). Devem-se definir com antecedência as melhores circunstâncias para o processo, possibilitando a ocorrência dos fenômenos de degradação e desvulcanização das partículas de borracha, e a fusão com as moléculas do asfalto (LEITE, 1999).

As características da borracha utilizada na modificação do ligante, também influenciam no processo de interação. Destacando o processo utilizado para moagem da borracha de pneus, densidade, textura, granulometria e o teor a se adicionar a mistura (LO PRESTI, 2013).

A adição e o aumento do teor das partículas de pneu, na modificação do ligante asfáltico influenciam no aumento da viscosidade e resistência à deformação quando exposto alta temperatura (ponto de amolecimento). Entretanto, o excesso no teor de borracha pode tornar o ligante asfáltico pouco resistente a trincas sob baixa temperatura e a fadiga. O Asfalto-Borracha apresenta melhor desempenho na faixa de porcentagem de borracha entre 18 a 24% (GUO Q. et al., 2014).

Segundo Li P. (2017), o aumento da amplitude do tamanho médio das partículas de borracha moídas causada pelo inchamento, cresce gradualmente além

do volume da taxa de expansão com o aumento da porcentagem de borracha, nas condições de temperatura de inchamento de 175°C e 1,5h de tempo de digestão. A taxa de expansão atinge o máximo de aumento a 6,49 vezes, quando a porcentagem de partículas de borracha moída é de 20%. Enquanto a taxa de expansão de volume com 5% de porcentagem de borracha é menor, o volume médio das partículas de borracha aumenta apenas 1,06 vezes. A Variação de volume das partículas de borracha tem relação com os componentes leves do asfalto, depois do inchaço e aumento do volume das partículas, acontece à absorção das frações leves do asfalto que tem uma forte solubilidade em borracha. E se a porcentagem de partículas de borracha é pequena, a cadeia molecular na superfície da borracha inchada irá se degradar e dissolver nos componentes do asfalto, e o volume da partícula de borracha diminuem. Porém, se a porcentagem de borracha continuar aumentando, o fenômeno de inchamento não é suficiente e a taxa de expansão do volume diminui gradualmente, devido à falta de componentes leves.

Abordando agora o segundo grupo sobre o processo de produção do Asfalto-Borracha, destacam-se como maior influência a temperatura e o tempo de reação. Pois em temperaturas convencionais como 160°C, o fenômeno de inchamento da borracha é a única interação que ocorre, para que haja uma interação efetiva com despolimerização e desvulcanização indicam-se temperaturas próximas de 240°C. O Tempo de reação ou digestão, também tem influência sobre as interações do Asfalto-Borracha e é determinada pelas características de cada material. O efeito causado pelo tempo de digestão tem ligação direta com a temperatura do processo de mistura. Está presente na literatura a identificação de dois estágios relacionados ao período de tempo de digestão: período inicial: de curta duração (30 a 40min) onde ocorre grande parte das interações, e período de longo prazo (2 a 4hrs) onde ocorre o processo de estabilização do Asfalto-Borracha (ABDELRAHMAN e CARPENTER, 1999).

O preparo do Asfalto-Borracha requer agitação e cisalhamento, sendo o tempo de digestão um importante parâmetro do processo de produção, afetando o desempenho do ligante modificado. Com um tempo de digestão curto, as partículas de borracha não conseguem modificar o asfalto, devido ao fenômeno de inchaço insuficiente. Porém, se o tempo de digestão for muito elevado, existe a possibilidade de levar a uma alta degradação das partículas de borrachas e deteriorar o Asfalto-

Borracha. O tempo razoável de preparação do Asfalto-Borracha é de 45min e não deve exceder 4hrs (LI T. *et al.*, 2011).

Segundo Li P. *et al.* (2017), existe uma relação entre temperatura e o teor de partícula de borracha, para que o modificador absorva continuamente os componentes leves do asfalto, e o volume das partículas aumente de acordo com a extensão do tempo de digestão. Por outro lado, a degradação da borracha vai agravar ao passar de um elevado tempo de digestão, diminuindo o fenômeno de inchamento. Portanto, é necessária a escolha do tempo de digestão apropriado no processo de produção do Asfalto-Borracha.

A temperatura de preparo, do ligante modificado por borracha de pneus inservíveis tem grande efeito sobre os aspectos físicos e de interação, entre a borracha e o ligante asfáltico. Estudos avaliando a temperatura e o tempo de digestão no desempenho do Asfalto-Borracha, tem sugerido a produção do ligante modificado com borracha a temperaturas na faixa de 180 a 190°C (LI T. *et al.*, 2011). E que a degradação excessiva da borracha causa a atenuação do desempenho do Asfalto-Borracha quando a temperatura é superior a 200°C (SHI *et al.*, 2013). O motivo é que a liquidez do asfalto é pouca a baixa temperatura. Consequentemente, a capacidade de infiltração de componentes leves em a borracha moída está baixa. Enquanto isso, a atividade da borracha moída para absorver o componente é limitada. Assim, a expansão devido ao inchaço é menor. Quando a temperatura chega a 175 ° C, a capacidade de infiltração dos componentes leves e a atividade da borracha é significativamente aprimorada, e a taxa de expansão das partículas de borracha atinge o máximo. Contudo, ocorrerá uma degradação grave da borracha, a capacidade de dissolução do componente leve aumentará dramaticamente quando a temperatura estiver acima de 195 ° C, diminuindo a taxa de expansão causada pela reação de inchaço (LI P. *et al.*, 2017)

Outros estudos apontam que altas velocidades de agitação, durante a produção do ligante modificado com borracha de pneus, ajudam na ocorrência das interações da mistura e também provocam maior inchamento das partículas de borracha, possibilitando a redução do tempo de digestão (BILLITER *et al.*, 1997; SPECHT, 2004; FAXINA, 2006).

Segunda Thives *et al.* (2013), o desempenho do ligante modificado por borracha, também depende das propriedades elastoméricas das partículas do modificador, onde o processo de fabricação dessas partículas, assim como o tempo

de digestão na produção do Asfalo-Borracha, são influentes sobre essas propriedades. O tempo de digestão é responsável pela interação entre a borracha moída e o asfalto, que por sua vez caracteriza-se pela quantidade de propriedades elastoméricas transferidas para o asfalto. Em seu estudo, avaliaram-se o tempo de digestão, usando ensaios convencionais relacionados ao desempenho e análises de microscopia eletrônica de varredura, examinando-se a superfície do ligante modificado. Na metodologia, consideraram-se dois asfaltos convencionais com penetrações de 30 e 50 dmm, assim como dois tipos de partículas de borracha de pneus inservíveis, uma obtida pelo processo de temperatura ambiente com granulometrias entre (0,005 a 1,2mm) e superfície específica de 19,3 m<sup>2</sup>/kg e outra pelo processo de temperatura criogênica, com granulometrias entre (0,2 a 0,8mm) e superfície específica de 13,6 m<sup>2</sup>/kg. O método de confecção utilizou-se de teores de (16, 17 e 20%) de partículas de borracha em peso de ligante asfáltico, tempos de digestão de (30, 45, 60 e 90 min), em temperatura de digestão de (180°C). Com análise dos resultados observou-se que, a interação entre borracha e asfalto sob tais condições, fica evidente aos 30 e 45 min digestão, onde muitas partículas de borracha estão presentes no ligante, aos 60 min a maior parte das partículas encontra-se dispersas e aos 90min se têm a dispersão total das partículas. Quanto o tipo de processo de moagem e ligante asfáltico, apontou-se que borrachas produzidas pelo processo de temperatura ambiental interagem melhor com asfaltos menos regidos, e que borrachas produzidas pelo processo à temperatura criogênica interagem melhor a ligantes asfálticos menos rígidos.

Venudharan *et al.* (2018), realizaram investigação comportamental reológica e termoquímica de ligantes Asfalto-Borracha, para avaliar o efeito de alguns parâmetros de adição de borracha de pneus, nas características do ligante modificado. E também determinar a granulometria e teor mais adequados na melhoria do desempenho mecânico do ligante. O escopo do trabalho incluiu a preparação de ligantes modificados por borracha em laboratório, foram utilizadas no total, nove faixas granulométricas de partículas de borracha para modificação de ligante asfáltico, especificadas pelos seguintes órgãos: Texas *Department of Transportation* – DOT, Florida DOT, Arizona DOT e Califórnia DOT. A borracha utilizada na pesquisa foi obtida de pneus de caminho triturados, com uma granulometria entre 2,0 e 0,075mm. Para o teor de borracha foram utilizadas três dosagens diferentes (10, 20 e 30%) em peso do ligante de asfalto virgem. O ligante

asfáltico de base foi o VG40 com viscosidade a 60°C – 4000P. A mistura foi mantida a 170 – 180°C e misturada por 90min a uma agitação de 2000 rpm. A pesquisa concluiu que a inclusão de borracha de pneus no ligante asfáltico diminui a penetração e aumenta o ponto de amolecimento, resultando em um ligante mais rígido. E a porcentagem de borracha de 20% e faixas granulométricas mais finas, resultaram em aumento da elasticidade, maior resistência a altas temperaturas, maior estabilidade térmica e melhor desempenho sob cargas extremas de tráfego, quando comparado a ligante virgem. Por fim, confirma-se que a adição de borracha de pneus melhora substancialmente as propriedades do ligante, onde a porcentagem e a granulometria da borracha são elementos contribuintemente críticos para a melhoria das características reológicas e térmicas do ligante Asfalto-Borracha.

### 3.6.3 Penetração

Os valores para o ensaio de Penetração são reduzidos quando se adiciona borracha de pneus inservíveis para modificar o ligante asfáltico, indicativo da maior rigidez em comparação ao ligante convencional. O efeito de redução no valor da penetração tem como agentes responsáveis as variáveis, porcentagem e granulometria das partículas de borracha. Na pesquisa de Venudharan *et al.* (2018), a adições de borracha nos teores entre 0 e 20%, diminuiu o valor da penetração. Entretanto, houve um aumento no parâmetro ensaiado, quanto adicionado ao ligante porcentagens de borracha de pneu de 20 e 30%, fato que talvez se deva a quantidade baixa de óleos aromáticos e resinas no ligante convencional, usado como base. Foi notado também que, os ligantes modificados com granulometrias mais finas de partículas de borracha, produziram cimentos asfálticos modificados com menor penetração.

### 3.6.4 Ponto de amolecimento

A adição de borracha de pneus em ligante asfáltico, faz com que o ponto de amolecimento do composto aumente, indicando um possível aumento da resistência à deformação permanente nas trilhas de roda. O asfalto-borracha apresenta valores para o ponto de amolecimento, de 11°C a 14°C a mais comparada com ligantes

asfálticos convencionais (ODA e FERNANDES JR., 2001; SPECHT, 2004; FHWA, 2017).

Em uma análise de Venudharan *et al.* (2018), observou-se que o ponto de amolecimento aumenta com o aumento da porcentagem de borracha, no entanto, a uma dada porcentagem as frações de óleos e resinas se tornam insuficientes para a absorção pelas partículas de borracha, devido a sua grande quantidade e assim levanta a uma redução na temperatura do ponto de amolecimento. Também foi observado que, ligantes modificados por granulometria mais finas produzem um ponto de amolecimento mais alto, que outros ligantes modificados com granulometrias maiores ou mais grossas de borracha. Entende-se o ocorrido, pelo fato de partículas com granulometria menores apresentam maior área específica, em comparação a granulometrias maiores. Assim, a taxa de absorção de constituintes do ligante de baixo peso molecular é maior, por partículas de granulometria mais fina.

Segundo Thives *et al.* (2013), a influência que o teor de borracha exerce sob o aumento do ponto de amolecimento, pode ser expressa como um aumento de aproximadamente 2 - 4°C com o aumento de 1% no teor de borracha. E que o aumento do tempo do tempo de digestão começa a ser mais significativo, a partir de adição de 20% de borracha na mistura.

#### 3.6.4 Viscosidade

A viscosidade representa o atrito interno do fluido, e determina as temperaturas de bombeamento do ligante asfáltico, usinagem e compactação das misturas. Para se medir a viscosidade dos ligantes tem se utilizado o viscosímetro rotacional (Brookfield). O SHRP classificou valores máximos de 3000cp com a intenção de assegurar o fácil bombeamento dos ligantes asfálticos e a trabalhabilidade das misturas asfálticas (FAXINA, 2006).

Os elevados resultados de viscosidade apresentados pelo Asfalto-Borracha se deve a insolubilidade das partículas de borracha no cimento asfáltico, caso ocorresse a toda solubilidade das partículas, resultariam em um ligante asfáltico modificado homogêneo e de menor viscosidade (ZAMAN *et al.* 1995; BILLITER *et al.* 1997).

A viscosidade elevada do Asfalto-Borracha ajuda a aumentar a espessura da membrana que envolve os agregados da massa asfáltica, não havendo o risco de ocasionar escorrimento do ligante asfáltico ou exsudação na mistura (CALTRANS, 2003).

### 3.6.5 Parâmetros reológicos

O comportamento reológico do ligante asfáltico sofre mudanças quando modificado com borracha de pneu, devido ao fato da principal característica da borracha ser sua elevada elasticidade, efeito da estrutura da sua cadeia molecular, que possibilita a recuperação instantânea da deformação após o final da sollicitação. Pertencente à família dos polímeros, a borracha também é um elastômero (LOPRESTI, 2013). Devido as seguintes propriedades:

- a) As moléculas são muito longas e livres para girar ao redor das ligações vizinhas de unidade moleculares.
- b) As moléculas são ligadas de forma química e física, em diversos pontos formando uma rede tridimensional, chamada ligação cruzada ou reticulada.
- c) As moléculas se movimentam entre si, pelo fato das forças de Van der Waal serem pequenas (LOPRESTI, 2013).

A borracha tem boa resistência a temperaturas superiores, mantendo a suas propriedades. Esse comportamento é atribuído à estrutura reticulada das moléculas da borracha (LOPRESTI, 2013).

### 3.6.6 Estabilidade à estocagem

A separação entre as fases do ligante asfáltico modificado por borracha pode ocorrer em dois momentos, no transporte ou na estocagem. Esse fenômeno ocorre devido as diferentes propriedades físicas dos materiais envolvidos na mistura, formação do Asfalto-Borracha, a decantação das partículas de borracha é um indicativo disso, por possuírem densidades maiores apresentam essa tendência, no período inicial da mistura ou se o ligante é estocado a altas temperaturas. Para evitar ou eliminar esses problemas, deve-se selecionar os materiais que serão utilizados na produção do Asfalto-Borracha, com a intenção de buscar uma elevada

solubilidade da borracha no ligante, em alguns casos o emprego de enxofre pode melhorar a ligação cruzada e a compatibilidade do asfalto com a borracha, ou ainda empregar baixas temperaturas de estocagem, assim como reduzir o tempo de estocagem (LOPRESTI, 2013).

No estudo de Venudharan *et al.* (2018), os resultados dos testes de separação de fase indicaram que, com o aumento do teor de borracha para modificar o ligante, o índice de compatibilidade aumentou, pois, a eficiência da suspensão de partículas de borracha foi reduzida devido a repulsão intramolecular. Assim, a taxa de partículas acomodadas no fundo aumentou devido à armazenagem a temperaturas extremas e sem agitação. No entanto, ligantes modificados com granulometrias mais finas, apresentaram um índice de compatibilidade menor. Devido ao fato das partículas mais finas possuírem uma área de superfície maior, elas interagem melhor com o ligante asfáltico, aumentando a estabilidade da mistura durante o armazenamento.

### **3.7 CARACTERÍSTICAS DO CBUQ PRODUZIDO COM BORRACHA DE PNEU**

O ligante denominado Asfalto-Borracha, teve as primeiras execuções em pequenas obras de manutenção e conservação de pavimentos, como já cita anteriormente nesta pesquisa. A maior elaboração do método fez com que se tornasse possível sua execução em obras maiores, em um primeiro momento em tratamento superficial e em seguida com o desenvolvimento da produção de concreto asfáltico usinado à quente modificado com esse tipo de ligante, se executou pavimentos de cerca de vários quilômetros. Ao decorrer desse capítulo aborda-se características da mistura de CBUQ modificado com Asfalto-Borracha.

#### **3.7.1 Dosagem do CBUQ modificado**

O CBUQ modificado com ligante Asfalto-Borracha tem sido produzido em diversas faixas granulométricas, principalmente com faixas descontínuas, como o *Stone Matrix Asphalt*, *Gap Graded* ou *Open graded*. Entretanto, o concreto asfáltico modificado também pode ser produzido com granulometria densa (ODA E FERNANDES JR., 2001; CALTRANS, 2003; WAY, 2012; FHWA, 2017).

As técnicas laboratoriais utilizadas para elaboração da dosagem densa se assemelham as empregadas em concretos asfálticos convencionais, cita-se o método Marshall. Porém, pelo fato de a mistura modificada por borracha de pneu apresentar elevada viscosidade, o composto modificado é usinado a temperaturas que alcançam os 190°C (FHWA, 2017).

Corriqueiramente o CBUQ produzido com Asfalto-Borracha necessita de maiores teores de cimento asfáltico, ao comparar com composto asfáltico produzido com ligante convencional. As razões para que isso aconteça são duas:

- A. O ligante modificado por borracha de pneus possui alta viscosidade, devido a isto, a membrana asfáltica que envolve o agregado tem maior espessura.
- B. Os fragmentos do modificador que não se fundem com o asfalto, representam o papel de agregado sólido, aumentando o volume de vazios e conseqüentemente de ligante, e não apresentam característica adesiva.

Existem recomendações para que se considere 20% a mais de teor de ligante no caso de utilizar uma mistura asfáltica contendo 20% de borracha. Pois em pesquisas já publicadas, foi concluído que ao aumentar a porcentagem de modificador na mistura, o teor de ligante no projeto da mistura asfáltica também aumenta (EPPS, 1994; SPECHT, 2004).

### 3.7.2 Resistência a tração

Costumeiramente a produção de CBUQ com ligante modificado com borracha de pneu resulta em produto com menor resistência a tração, quando comparado com a mistura asfáltica convencional. Pode –se relacionar a redução da resistência a tração, com a alta viscosidade e a espessura da membrana asfáltica que envolve os agregados. Podendo intervir na fixação entre os agregados atuando como lubrificando e impossibilitando um intertravamento. Alguns estudos apresentam valores para resistência de misturas com Asfalto-Borracha 40% abaixo do valor de referência, e outros resultam a parâmetros para resistência a tração, semelhantes ao citado (FAXINA, 2002; SPECHT et al., 2002).

Em outras pesquisas publicadas, não se observou essa consequência ao se adicionar borracha de pneu no ligante, quando ensaiado a temperatura padrão de

25°C, a resistência a tração foi pouco afetada pelo modificador, mas em temperaturas mais altas, as misturas com Asfalto-Borracha têm uma menor perda de resistência, e em alguns casos até ganho no parâmetro (MORILHA JÚNIOR, 2004; SPECHT, 2004).

### 3.7.3 Resistência à deformação Permanente

A deformação permanente que ocorre nos pavimentos asfálticos é um fenômeno não desejado, que configura defeito no revestimento, podendo ser causado pela a classificação errônea dos materiais utilizados para produção do concreto asfáltico, exposição do pavimento a temperaturas elevadas e projeto de dosagem com deficiência no dimensionamento. Os ensaios laboratoriais utilizados para detectar essas falhas, antes da execução da obra, são o simulador de trilha de roda tipo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*), o ensaio fluência estática e dinâmica (creep), ensaio de *Flow Number* e até simuladores de tráfego do tipo HVS (*Heavy Vehicle Simulator*) (CPR, 2017).

Uma pesquisa realizada por Camargo (2016) teve como objeto de estudo, ensaios desenvolvidos em laboratório para avaliar as características mecânicas de um ligante Asfalto-Borracha produzido pela técnica *Continuous Blending*. Foi adotada neste estudo a faixa granulométrica *Gap Graded* conforme especificação do departamento de transporte do Arizona (ADOT), para execução de pavimento na Rodovia RJ-122 no Estado do Rio de Janeiro. Os corpos de prova moldados em laboratório e ensaiados em um simulador do tipo LCP, resultaram em afundamento de trilha de roda com níveis de deformação de 4,2% sendo inferior ao recomendado de 5%. A pesquisa ainda apresenta ensaios em corpos de prova extraídos da pista executada, e o resultado da deformação foi a inda menor dos valores obtidos pelas amostras feitas em laboratório.

No pavimento executado na Rodovia RJ-122, desenvolveram-se também testes com o *Heavy Vehicle Simulator* (HVS), que avalia a evolução da deformação permanente de forma acelerada. Os resultados concluíram que o pavimento construído com Asfalto-Borracha tem uma vida útil de até 30% superior do convencional (BALAGUER, 2012).

### 3.7.4 Resistência à trinca por fadiga

Diversas pesquisas apresentam estudos relacionados à vida de fadiga em misturas asfálticas com ligante modificado com borracha de pneu. Ensaios de fadiga realizados em laboratório por Raad *et al.* (1993) concluem que concretos asfálticos com Asfalto-Borracha possuem maior resistência a fadiga, quando comparados com concretos convencionais, uma relação de 1,5 para 1 a 3 para 1.

Sousa *et al.* (1999) em sua pesquisa foram avaliadas misturas asfálticas convencionais e modificadas com 20% de borracha. Os resultados dos ensaios de fadiga apresentaram comportamento para o CBUQ modificado, de 10 vezes superior ao convencional.

Segunda Specht (2004), ligantes modificados com borracha de pneu no teor entre 12 e 18% resultam em produtos com maior resistência à fadiga. Para o autor, ao aplicar o mesmo estado de tensões, todas as misturas modificadas avaliadas apresentam desempenho superior ao de misturas asfálticas convencionais.

### 3.7.5 Resistência à reflexão de trincas

O Asfalto-Borracha teve como primeira utilização o emprego em camadas de pavimento anti-reflexão de trincas, a mistura é produzida com ligante asfáltico modificado por 25 a 30% de borracha.

Foi desenvolvido nos Estados Unidos pelo Departamento de Transporte do Estado do Arizona (ADOT), uma pesquisa para monitorar o surgimento de trincas em pavimentos construídos com ligante convencional e modificado. A Figura 4 mostra o desenvolvimento da reflexão de trincas em relação do tempo, pode-se observar que a projeção no gráfico das trincas em pavimento convencional e notavelmente maior quando comparado a um pavimento modificado por Asfalto-Borracha (WAY *et al.*, 2009).

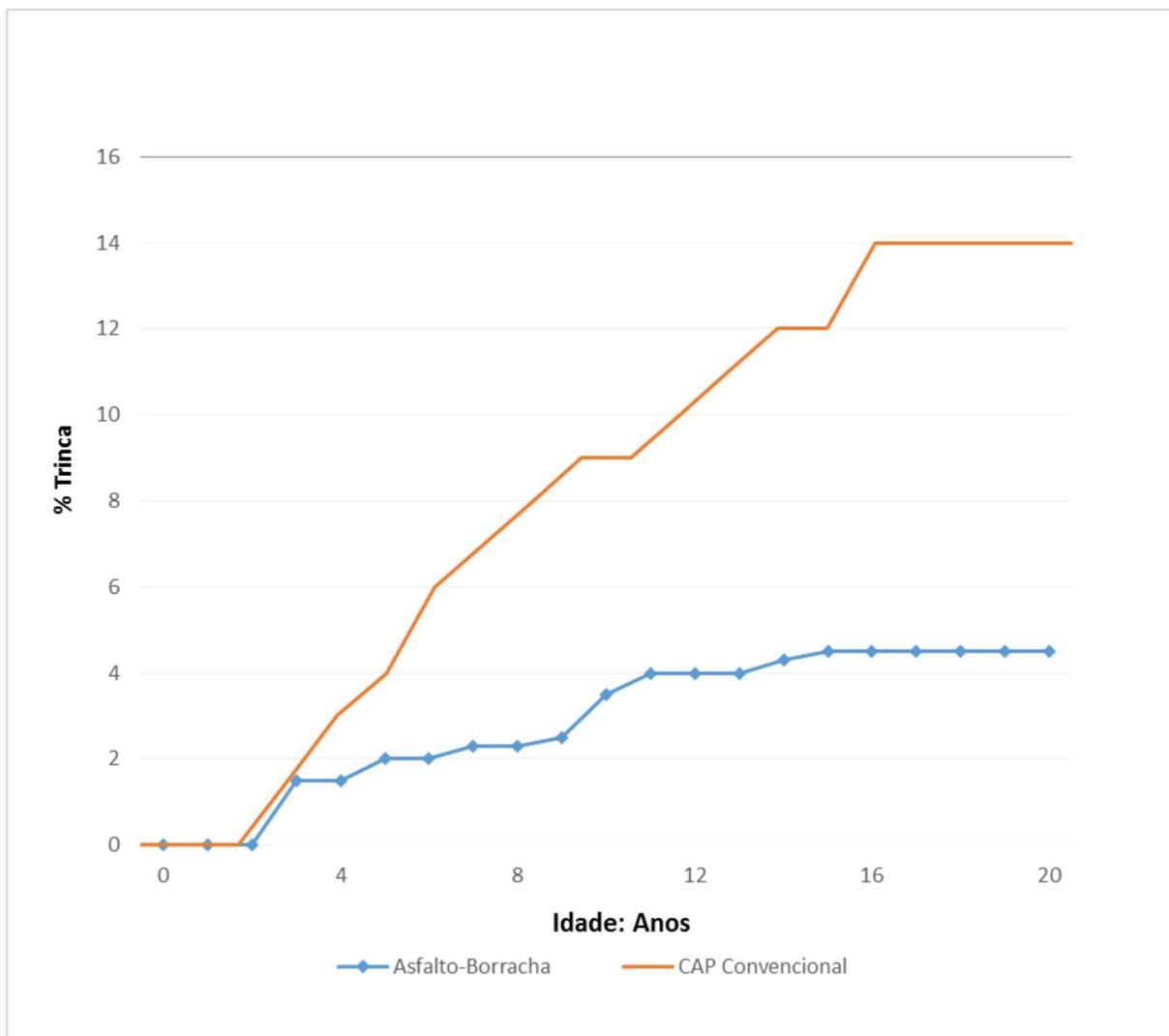


Figura 4 – Área trincada em pavimentos construídos com Asfalto-Borracha e ligante asfáltico convencional. FONTE: Way *et al.*, (2009).

### 3.7.6 Durabilidade

Segundo Sousa *et al.* (1999) as misturas asfálticas produzidas com Asfalto-Borracha apresentam menor enrijecimento causado pelo envelhecimento, em relação às misturas asfálticas convencionais.

Ensaio laboratoriais em compostos asfálticos modificados com borracha, resultam em maior resistência ao envelhecimento do que compósitos asfálticos convencionais. Pesquisas no Estado do Arizona nos Estados Unidos, concluem maior resistência ao enrijecimento nas camadas de pavimentos executados ou reformados com ligante modifica por borracha de pneu (FHWA, 2017).

### 3.8 NORMATIVAS DE ASFALTO-BORRACHA

#### 3.8.1 Norma Estado Unidense e Canadense

O modificador pó de borracha utilizado na produção de Asfalto-Borracha deve atender alguns critérios, segundo a ASTM D6114:

- Umidade inferior a 0,75% e flutuação livre;
- Massa específica de 1,15 +/- 0,05;

Não deve apresentar partículas metálicas não ferrosas visíveis;

- Não deve ter mais que 0,01% em peso de partículas metálicas ferrosas;
- O conteúdo de fibras deve ser inferior a 0,5% em peso, para aplicações do ligante asfáltico a quente;
- Todas as partículas de borracha devem passar na peneira de 2,36mm de abertura.

No Canadá e nos Estados Unidos cada estado tem a sua normativa e ainda classifica a granulometria da mistura asfáltica a ser utilizada. Nas Tabelas 3 a 10 são disponibilizadas algumas normas dos principais Departamentos de Transporte (DOT) dos Estados Unidos e Canadá.

Especificações	Granulometria	Aditivos		Outros
		Passante (%)		
	Peneira (mm)	Min	Max	
→ Pneus de passeio unicamente				Densidade de 1,1 a 1,2
→ Não desvulcanizados	2,36	100	100	
→ Trituração a temperatura ambiente ou criogênica	2,00	100	100	
	1,18	80	100	
→ Seca e de flutuação livre	0,60	40	60	
	0,30	5	15	
	0,15	0	10	

Tabela 3 – Especificações do Ministério de Transportes de Ontário, Canadá, para o pó de borracha usado pela via úmida no processo *Continuous Blending* (CPR, 2017).

<b>Especificações</b>	<b>Granulometria</b>	<b>Aditivos</b>	<b>Outros</b>
→ Pneus de passeio unicamente		Nenhum	Densidade de 1,1 a 1,2
→ Não desvulcanizados	→ 100% passante da peneira 1,0mm		
→ Trituração a temperatura ambiente ou criogênica	→ Granulometria deve estar de acordo com o Tipo III da ASTM		
→ Seca e de flutuação livre			

Tabela 4 - Especificação do Ministério de Transportes de Ontário, Canadá, para o pó de borracha usado pela via úmida no processo *Terminal Blending* (CPR 2017).

<b>Especificações</b>	<b>Granulometria</b>		<b>Aditivos</b>	<b>Outros</b>
→ Borracha de pneus inservíveis de carros, caminhões ou qualquer veículo dos Estados Unidos	<b>Para <i>Gap Graded e Open Graded</i></b>			Densidade de 1,05±0,05  Pode ser acrescentado até 4% de carbonato de cálcio em peso com relação à borracha
	Peneira (mm)	Passante (%)		
		Min	Max	
	2,00	100	100	
	1,18	65	100	
	0,60	20	100	
	0,30	0	45	
	0,1	0	5	
	Máximo de 0,5% de nylon			
	<b>Para <i>ChipSeals</i></b>			
2,36	100	100		
2,00	95	100		
1,18	0	10		
Máximo de 0,1% de nylon				
Mínimo de 20% em peso do ligante asfáltico				

Tabela 5 - Especificações do Departamento de Transportes da Arizona, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida (CPR, 2017).

Especificações	Granulometria			Aditivos	Outros
→ Combinação de borracha de pneus e borracha natural	<b>Da borracha de pneus</b>			Pode ser acrescentado 3% de carbonato de cálcio ou talco	Densidade de 1,1 a 1,2
	→ Trituração de pneus a temperatura ambiente	Peneira (mm)	Passante (%)		
Min			Max		
	2,36	100	100		
	2,00	100	100		
	1,18	80	100		
	0,60	40	60		
	0,30	5	15		
	0,15	0	10		
	0,075	0	10		
	<b>Da borracha natural</b>				
	2,36	100	100		
	2,00	100	100		
	1,18	80	100		
	0,60	40	60		
	0,30	5	15		
	0,15	0	10		
	0,075	0	10		

Tabela 6 – Especificações do Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans), Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida. Fonte (CPR, 2017).

Especificações	Granulometria			Aditivos	Outros
→ Borracha de pneus de carros ou caminhões	<b>"A"</b>			Nenhum	→ Para concreto asfáltico denso utilizar os Tipos I ou II da ASTM com Granulometria "C"
	→ Trituração em temperatura ambiente	Peneira (mm)	Passante (%)		
Min			Max		
	2,36	100	100		
	2,00	95	100		
→ Livre de contaminantes	0,30	0	10		
→ Flutuação livre	<b>"B"</b>				
	2,00	100	100		
→ Não espumar quando entrar em contato com o ligante asfáltico quente	1,18	70	100		
	0,60	25	60		
	0,08	0	5		
	<b>"C"</b>				
	1,18	100	100		
	0,60	90	100		
	0,425	45	100		

Tabela 7 - Especificações do Departamento de Transportes do Texas, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida. Fonte (CPR, 2017).

Especificações	Granulometria			Aditivos	Outros
	<b>"A"</b>				
→ Trituração em temperatura ambiente	Peneira (mm)	Passante (%)		Até 4% em peso de talco ou outro pó inerte com relação à borracha, para evitar aglutinamento entre as partículas de borracha	→ Extrato de acetona: máximo de 25%
→ Livre de contaminantes		Min	Max		
	0,30	100	100		→ Hidrocarbonetos: 40 a 55%
→ Seca	0,15	50	80		
	<b>"B"</b>				
	0,60	100	100		→ Cinzas: máximo de 8% de negro de fumo
	0,30	40	60		→ Borracha natural de 16 a 45%
	<b>"C"</b>				
	1,18	100	100		
	0,60	70	100		
	0,300	20	40		

Tabela 8 - Especificações do Departamento de Transportes da Flórida, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida. Fonte (CPR, 2017).

Especificações	Granulometria			Aditivos	Outros
	<b>"A"</b>				
→ Trituração em temperatura ambiente	Peneira (mm)	Passante (%)		Até 4% em peso de talco ou outro pó inerte com relação à borracha, para evitar aglutinamento entre as partículas de borracha	
→ Livre de fios metálicos ou outros materiais contaminantes		Min	Max		
	2,36	100	100		
	1,18	65	100		
→ Borracha de pneus de carros, caminhões ou outro equipamento dos Estados Unidos	0,60	20	100		
	0,30	0	45		
	0,075	0	5		

Tabela 9 - Especificações do Departamento de Transportes de New Jersey, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida. Fonte (CPR, 2017)

Especificações	Granulometria			Aditivos	Outros
	<b>"A"</b>				
→ Borracha vulcanizada triturada em temperatura ambiente	Peneira (mm)	Passante (%)		Até 4% em peso de carbonato de cálcio	Densidade de 1,15±0,05
		Min	Max		
	2,36	100	100		
	2,00	95	100		
	0,60	0	10		
0,300	0	5			

Tabela 10 - Especificações do Departamento de Transportes de Massachusetts, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida. Fonte (CPR, 2017)

A ASTM D6114 também especifica três tipos de asfalto borracha, cada um associado a um tipo de ligante asfáltico convencional a ser utilizado como base para a modificação:

- **Tipo I:** ligantes asfálticos mais duros usualmente recomendados para climas mais quentes, classificados como PG 64-16 na metodologia SUPERPAVE.
- **Tipo II:** ligantes asfálticos menos duros que o Tipo I, para climas moderados, classificados como PG 58-22 na metodologia SUPERPAVE.
- **Tipo III:** ligantes asfálticos mais moles, recomendados para climas mais frios, classificados como PG 52-28 na metodologia SUPERPAVE.

Os três tipos de asfalto borracha definidos pela ASTM D6114, também chamados de “alta viscosidade”, têm as características apresentadas na Tabela 11.

Característica	Normativa	Unidade	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Viscosidade aparente @ 177,5°C	ASTM D 2196	cP	1.500-5.000	1.500-5.000	1.500-5.000
Penetração @ 25°C	ASTM D5	dmm	25-75	25-75	50-100
Penetração @ 4°C	ASTM D5	dmm	Min. 10	Min. 15	Min. 25
Ponto de amolecimento	ASTM D36	°C	Min. 57,2	Min. 54,4	Min. 51,7
Resiliência @ 25°C	ASTM D5329	%	Min. 25	Min. 20	Min. 10
Ponto de fulgor	ASTM D93	°C	Min. 232,2	Min. 232,2	Min. 232,2
Penetração @ 4°C após TFOT (ASTM D1754)	ASTM D5	dmm	Min. 75	Min. 75	Min. 75
Clima da região a ser utilizado	-	-	Quente	Moderado	Frio
Temperatura mínima mensal	-	°C	-1	-9	-9
Temperatura máxima mensal	-	°C	43	43	27

Tabela 11 - Especificação de asfalto borracha segundo a ASTM D6114.

O ligante asfáltico é aquecido a temperaturas superiores a 177°C para então ser adicionado o pó de borracha moída, para que aconteça a interação física ente o ligante e a borracha. Com objetivo de diminuir a viscosidade, facilitar a distribuição da borracha e dar boa trabalhabilidade, podem ser adicionados aditivos como destilados de petróleo e óleos extensores na taxa de 2,5% a 6% em relação à massa do ligante SHATANAWI, 2008).

### 3.8.2 Normas na República da África do Sul

Segundo a norma Sul-africana *Committee of Land Transport Officials* (COLTO) orienta-se a utilização de no mínimo 30% de borracha natural reaproveitada em massa, enquanto que o Guia Técnico da Academia de Asfalto determina porcentagem de 60 a 75% de borracha natural, com granulometria total na peneira 1,18mm. Na Tabela 12 são apresentadas as informações de acordo a Academia de Asfalto Sul-africana.

<b>Característica</b>	<b>Especificação</b>		<b>Metodologia</b>
<b>Granulometria</b>			
<b>Peneira (mm)</b>			
1,18	100	100	MB-14
0,6	40	70	
0,075	0	5	
<b>Conteúdo de Poli-Isopreno (m/m dos hidrocarbonetos totais)</b>	<b>Mínimo 25%</b>		<b>Análise termo-gravimétrica</b>
<b>Comprimento de Fibras</b>	<b>Máximo 6mm</b>		
<b>Densidade</b>	<b>1,10 - 1,25</b>		<b>MB-16</b>

Tabela 12 - Especificação para as partículas de borracha. FONTE: Asphalt Academy (2007).

A Associação Sul-africana de Betume (SABITA) recomenda a utilização de cimentos asfálticos de penetração 60/70 e 80/100 (dmm), na elaboração de Asfalto-Borracha B12 e B8. O órgão também permite fazer uma mistura entre os cimentos asfálticos convencionais para atingir uma viscosidade desejada para o ligante.

O processo de fabricação de Asfalto-Borracha no país africano tem como características de 72 a 82% de cimento asfáltico, 0 a 4% de óleo extensor e 18 a 24% de borracha, misturado em um equipamento patenteado de alto cisalhamento com velocidade de 3.000 revoluções por minuto. O cimento asfáltico é aquecido a temperaturas entre 180 a 220°C, por um breve período de tempo antes da incorporação da borracha. Durante a adição da borracha é determinado manter as temperaturas entre 190 e 200°C, com o objetivo de facilitar a digestão da borracha pelo ligante.

O misturador que foi patenteado pela África do Sul está ilustrado na Figura 5.

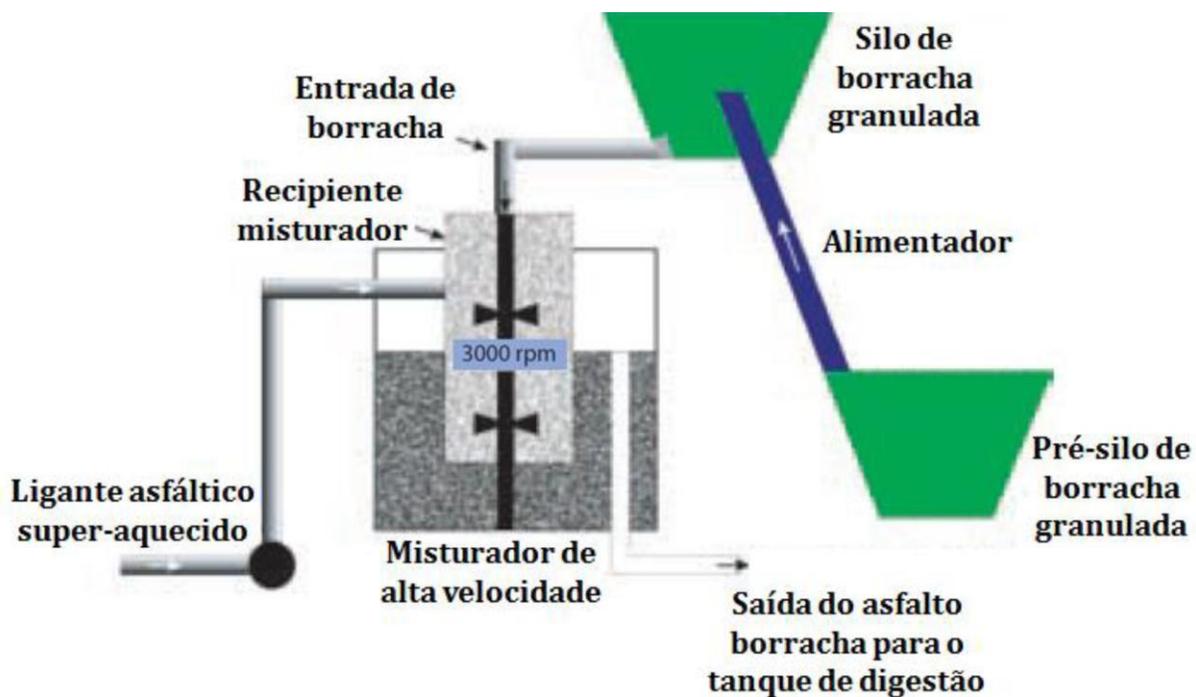


Figura 5 - Esquema do equipamento para produção de asfalto borracha. FONTE: Asphalt Academy (2007).

Os fabricantes de Asfalto-Borracha no país sul africano têm como padrão o teor de 20% de borracha na formulação do ligante modificado. É empregado um óleo extensor com ponto de fulgor superior a 180°C, com uma massa de hidrocarbonetos aromáticos não saturados, superior a 55%. Com o objetivo de minimizar o problema de aglutinação das partículas se permite o uso de carbonato de cálcio. Posterior à confecção do ligante modificado, deve-se mensurar a viscosidade do produto para concluir se o tempo de digestão foi páreo para transformar o ligante de cimento asfáltico. Os resultados devem estar dentro das especificações disponibilizadas na Tabela 13.

Característica	Unidade	Metodologia	TIPOS	
			S-R1	A-R1
Ponto de Amolecimento	°C	MB-17	55-62	55-65
Viscosidade dinâmica @ 190°C	dPa.s	MB-13	20-40	20-50
			>70	>80
			>70	>80
Recuperação na compressão	5 min	MB-11	>70	>80
	1 hora		>25	n/a
Resiliência @ 25°C	4 dias	MB-10	13-35	13-40
			MB-12	15-70
Fluência	Min			

Tabela 13 - Características do asfalto borracha para revestimentos selantes (S-R1) e para concretos asfálticos (A-R1). FONTE: Asphalt Academy (2007).

Em função da degradação do Asfalto-Borracha e da diminuição da viscosidade causada pelo tempo de inércia as altas temperaturas, recomenda-se a sua execução em até 4 horas. Passado esse período de tempo é possível se reutilizar até 25% do produto em outras produções do composto (ASPHALT ACADEMY, 2007). Para melhor compreensão da relação Viscosidade X Temperatura X Tempo desse ligante modificado é apresentada a Figura 6.

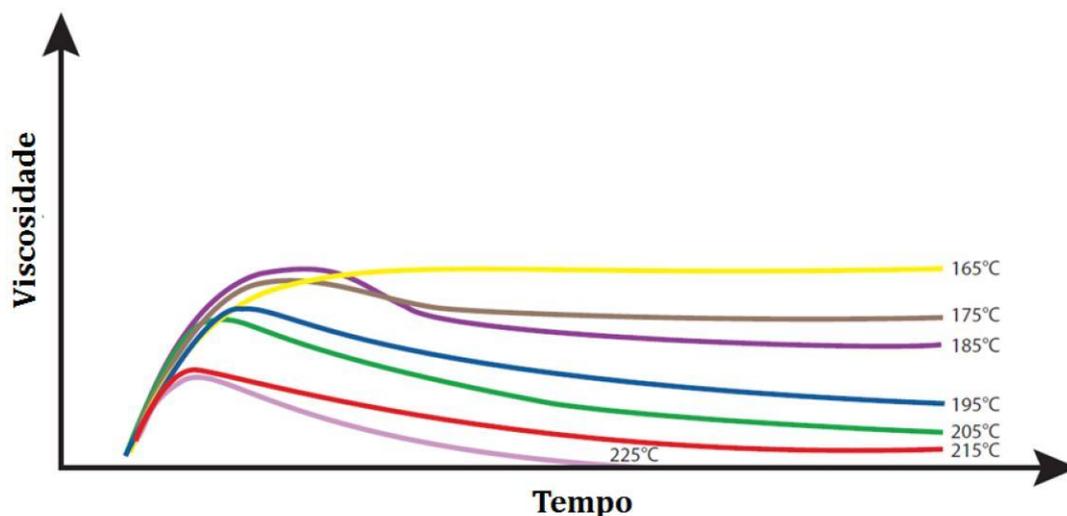


Figura 6 - Relação Viscosidade X Temperatura X Tempo do ligante modificado por borracha de pneus na África do Sul. FONTE: Asphalt Academy (2007).

Na Tabela 14 está o resumo dos ligantes asfálticos modificados, normatizados pela academia sul-africana, contendo: temperaturas, tempos de estocagem e aplicações do Asfalto-Borracha para suas distintas finalidades: S-R1,

revestimentos asfálticos selantes; A-R1, concretos asfálticos e C-R1 para selagem de trincas.

Tipo de Asfalto Borracha	Manipulação de curto prazo		Estocagem		Espargimento de selantes e para mistura em concreto asfáltico		
	Temp. Máx. (°C)	Tempo Máx. de Estocagem (h)	Temp. Máx. (°C)	Tempo Máx. de Estocagem (h)	Temp. Máx. (°C)	Temp. Mín. (°C)	Tempo Máx. de Estocagem (h)
S-R1	165	24	150	240	210	195	Verificar curva tempo/viscosidade
A-R1	165	24	150	240	210	190	
C-R1	165	24	-	-	190	180	

Tabela 14 - Temperatura e tempos de estocagem, mistura e aplicação do asfalto borracha.

FONTES: Asphalt Academy (2007).

### 3.8.3 Normas no continente Oceânico

A Associação de Autoridades de Tráfego e Transporte de Rodovias da Austrália e Novo Zelândia – AUSTROADS disponibiliza na Especificação AGPT/T190-2014, normativa para um grupo de ligantes modificados, dentre eles o Asfalto-Borracha. Na normal classifica dois tipos de borracha de pneus inservíveis, observando sua característica de tamanho, nomeadas pela abertura da peneira em mesh, são chamadas de 16 a com classificação de maior granulometria e de 30 a de menor. O cimento asfáltico utilizado deve atender ao ensaio de penetração de 85-100 dmm. Na Tabela 15 podemos observar as características exigidas pela norma para a classificação da borracha.

Característica	Metodologia	Tamanho 16	Tamanho 30
Granulometria			
Peneira (mm)			
2,36	AGPT/T143	100	100
1,18		> 80	100
0,60		< 10	> 60
0,30		-	< 20
Comprimento máximo da partícula (mm)	AGPT/T143	3	3
Densidade	AGPT/T144	Indicar	Indicar
Conteúdo máximo de umidade (%)	AGPT/T143	1	1
Materiais contaminantes não ferrosos (%max)	AGPT/T143	0,1	0,1
Materiais contaminantes ferrosos (%max)	AGPT/T143	0,1	0,1

Tabela 15 - Especificação Austroads AGPT/T190 para as partículas de borracha empregadas na modificação de ligantes asfálticos. FONTE: Austroads (2014).

A Austroads (2014) orienta a utilizar um procedimento experimental para obter o quantitativo necessário de materiais para a produção de Asfalto-Borracha, descrevendo o procedimento:

1. Primeiro deve-se testar uma mistura para cada concentração de borracha, a uma temperatura de 195°C, com um período de digestão de 45 min para borracha de classificação 16 e 30 min para a borracha de classificação 30.
2. As propriedades das misturas betuminosas são aferidas e comparadas em um gráfico em relação à concentração da borracha. O ligante modificado que atender as especificações é utilizado no projeto.
3. Para verificar a concentração de borracha escolhido para o projeto, deve-se extrair uma amostra de modificador, conforme metodologia de laboratório da Austroads AG:PT/T1 42. Os resultados são utilizados para padronização de amostras de campo ao decorrer da aplicação do Asfalto-Borracha.

São três especificações de Asfalto-Borracha no país Australiano, nomeados como S15RF, S18RF e S55R. As duas primeiras especificações são utilizadas em concreto betuminoso resinado a quente, e o terceiro é utilizado em camadas selantes. A norma também designa que esses ligantes podem ser misturados em fábrica de asfalto ou usina de asfalto na obra onde serão aplicados. Na mistura

asfáltica elaborada em fábrica, normalmente se adiciona óleos e as quantidades e granulometria de borracha são menores, em comparação com as misturas asfálticas elaboradas “in loco”. Essas misturas elaboradas em campo utilizam em média 25% de borracha em relação da massa e não se adiciona óleo extensor. São as melhores misturas de asfalto borracha, porém não devem ser transportados por longas distancias ou estocados por longos períodos de tempo (AUSTORoads, 2014).

#### 3.8.4. Normas no Brasil

Através da Norma DNIT 111/2009-EM o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), especifica o cimento de petróleo modificado pela adição de borracha moída de pneus inservíveis com granulometria passante na peneira nº 40, que representa 15 a 20% da massa do cimento asfáltico, através da via úmida do tipo *Terminal Blending*, sistema em que se produz o Asfalto-Borracha que pode ser estocado, onde se mistura os insumos em terminal especial, a temperaturas elevadas, por agitação com alto cisalhamento. Entretanto, não é especificado o tempo máximo de estocagem, atribuindo as condições de armazenagem e estocagem aos cuidados do fabricante do produto. Está norma também especifica as propriedades de duas espécies de Asfalto-Borracha, com o nome de AB-8 e AB-22 (DNIT, 2009). Na Tabela 16 podemos apreciar as suas especificações.

Características	Unidade	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	2200-2400	NBR 15529
Ponto de Fulgor, min	235	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				
Varição em massa, máx.	%	1	1	NBR 15235:2006
Varição do Ponto de Amolecimento, máx.	°C	10	10	DNER ME 247/94
Porcentagem de Penetração Original, mín.	%	55	55	DNER ME 003/99
Porcentagem da Recuperação Elástica Original, 25°C, 10cm, mín.	%	100	100	NBR 15086:2006

Tabela 16 - Especificação de asfalto borracha do DNIT 111/2009-EM. FONTE: DNIT (2009).

A normativa orienta a utilização de faixas granulométricas específicas para cada tipo de ligante modificado.

- AB-8: Faixas granulométricas "A", "B" e "C" do DNIT e para faixa descontínua "Gap Graded";
- AB-22: Faixas descontínua "Gap Graded".

Nos estados brasileiros do Paraná, Santa Catarina, São Paulo e Rio de Janeiro foram criadas especificações particulares para a produção de misturas asfálticas modificadas por borracha:

- Paraná: DER/PR ES-P28-05;
- Santa Catarina: DEINFRA-SC-P-05B/05;
- São Paulo: ET-DE-POO/030;
- Rio de Janeiro: DER/RJ IT 65, IT 66, IT 67, IT 68 e IT 69.

A seguir é feita uma comparação entre as especificações técnicas de três estados citadas anteriormente e com as especificações técnicas do DNIT. Nessas

normativas orienta-se a produção de Asfalto-Borracha pelo sistema “*Terminal Blending*”. Vide Tabela 17.

Instituição Rodoviária		DNIT	DER-SP	DER-PR	DER-SC	
Características	Unidade	Asfalto Borracha	Asfalto Borracha	Asfalto Borracha	Asfalto Borracha	Métodos de Ensaio
		Tipo AB 8				
Penetração, 100g, 5s, 25°C	0,1mm	30-70	25-75	25-75	25-75	DNER ME 003/99
Ponto de Amolecimento, min, °C	°C	55	55	55	55	DNER ME 247/94
Viscosidade Brookfield, 175°C, 20rpm, Spindle 3	cP	800-2000	800-2000	800-2500	800-2500	NBR 15529
Ponto de Fulgor, min	235	235	235	235	235	DNER ME 148/94
Recuperação Elástica Ductilômetro, 25°C, 10 cm, min	%	50	-	-	-	NBR 15086:2006
Recuperação Elástica por torção	%	-	50	50	50	NLT 329
Densidade Relativa, 25°C		-	1,00-1,05	1,00-1,05	1,00-1,05	NBR 6296
Estabilidade à estocagem, máx	°C	9	-	-	-	DNER ME 384/99
<b>Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C</b>						
Varição em massa, máx.	%	1,0	1,0	1,0	1,0	NBR 15235:2006
Varição do Ponto de Amolecimento, máx.	°C	10	-	-	-	DNER ME 247/94
Porcentagem de Penetração Original, mín.	%	55	50	50	50	DNER ME 003/99
Porcentagem da Recuperação Elástica Original, 25°C, 10cm, mín.	%	100	-	-	-	NBR 15086:2006

Tabela 17 - Comparativo das especificações técnicas de órgãos estaduais com as especificações técnicas do DNIT. FONTE: CPR (2017).

Em relação as especificações técnicas do DER/RJ, orienta-se a produção do Asfalto-Borracha através do sistema “*Continuous Blending*”, com teor de borracha mínimo de 18%, alta viscosidade definida por valores entre 2.500 cP até 6.500 cP a temperatura de 175°C, sem adição de óleo, xisto ou estabilizadores de ligante. Ainda determina que a fusão das partículas de borracha com o ligante asfáltico, tem como resultado um produto pastoso, homogêneo em 95% do seu volume e heterogêneo nos 5% restantes (DER/RJ 2015).

Na Tabela 18 a seguir, são apresentadas as características básicas do ligante modificado, resultado das especificações técnicas do DER/RJ IT-66.

<b>Ensaio</b>	<b>Características Básicas do BMB para o CAP 30/45 OU 50/70</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>
<b>DNER-ME 003/94</b> <b>ASTM D5</b>	Penetração, 100g, 5 segundos, 25°C, 0,1 mm	15	-
<b>DNER-ME 148/94</b>	Ponto de fulgor	-	220°C
<b>DNIT 131/10-ME</b> <b>ASTM D36</b>	Ponto de amolecimento	70°C	-
<b>ASTM-2196/99</b>	Viscosidade Brookfield a 175°C	2500 cP	6500 cP
<b>ASTM-D 5329</b>	Resiliência	30%	-

Tabela 18 - Características do Ligante Modificado. FONTE: DER/RJ (2015).

### **3.9 Experiências Brasileiras com Asfalto-Borracha pelo Sistema *Continuous Blending***

Pesquisa realizada por Oda S. (2000), analisa a viabilidade técnica da incorporação do ligante Asfalto-Borracha em obras de pavimentação. Os fatores que condicionam o comportamento do ligante Asfalto-Borracha (teor 6, 12, 18 e 24% e granulometria #40 e 50 da borracha, temperatura de mistura 160°C e 170°C, tempo de reação), através de ensaios tradicionais de caracterização de ligantes asfálticos e ensaios do Método *Superpave*, que investiga propriedades fundamentais para a conclusão do desempenho dos pavimentos asfálticos em campo. As análises resultam em conclusão evidente da importância do teor de borracha para efeito das propriedades reológicas, responsáveis pelas principais causas de deterioração da estrutura das misturas asfálticas. As misturas com maiores teores de borracha apresentaram altos valores de  $G^*/\sin \delta$ , significado uma maior resistência ao acúmulo de deformações permanentes. Além disso, apresentaram valores para o ângulo de fase decrescente com aumento do teor de borracha, indicando um aumento de resistência à formação de trincas por fadiga no pavimento devido a maior elasticidade do ligante.

Uma pesquisa elaborada por Pereira et al. (2009), conclui que o teor de borracha adicionada ao ligante Asfalto-Borracha, influencia e determina as características do ligante modificado, melhorando a recuperação elástica com aumento da resiliência.

Materiais brasileiros foram testados em laboratório na elaboração de Asfalto-Borracha, com a conclusão de que esses insumos são apropriados para a finalidade de manutenção/conservação de pavimentos. Os resultados do módulo de rigidez das misturas betuminosas produzidas com o ligante modificado, tanto pelo sistema *Terminal Blending* quanto pelo sistema *Continuous Blending*, não apresentaram divergências significativas (PEREIRA et al., 2003).

Um grupo de pesquisadores desenvolveu a comparação em laboratório do desempenho de Asfaltos-Borracha, produzido pelo sistema *Terminal Blending* e sistema *Continuous Blending*, por meio de ensaios de caracterização, concluíram que os ligantes modificados produzidos pelos dois sistemas, demonstraram melhor desempenho que misturas betuminosas convencionais (FONTES et al., 2007).

Em sua pesquisa Camargo (2016), analisa as possíveis vantagens tecnológicas do Asfalto-Borracha produzido pelo sistema *Continuous Blending*, para isso foi elaborada uma pesquisa em laboratório, para verificar as propriedades reológicas de um ligante modificado por borracha de pneus inservíveis e produzido através desse sistema, em seguida foram comparadas com as características de ligantes tipicamente empregados no Brasil. Devido os resultados dos ensaios, conseguiu concluir que o Asfalto-Borracha produzido pelo sistema *Continuous Blending*, apresentam um bom desempenho em relação à deformação permanente e à fadiga.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1 Considerações Iniciais

Para avaliação dos fatores intervenientes na produção do ligante Asfalto-Borracha e diferentes formulações para o ligante modificado, desenvolveu-se um programa de ensaios onde identificou-se os efeitos causados por diversos fatores nos resultados obtidos.

No presente capítulo é apresentado o programa experimental utilizado para o desenvolvimento dessa pesquisa, no qual são descritas as técnicas de ensaios utilizadas para obtenção dos resultados, além da verificação de enquadramento dos parâmetros pelas normas de especificações técnicas de diferentes países e estados.

### 4.2 Planejamento Experimental

As variáveis intervenientes nas propriedades de um cimento asfáltico modificado são de elevada complexidade, assim como suas interações dependem de certos fatores, como: a granulometria da borracha, a porcentagem de borracha, a temperatura e o tempo de mistura.

Através da literatura presente no referencial teórico montou-se um programa experimental. As variáveis independentes selecionadas e seus níveis basearam-se em pesquisas relevantes sobre o tema proposto já realizadas. Procurou-se complementar essa literatura, pesquisando condições de trabalho limitantes e inéditas (BOULDING *et al.*; 1990 ABDELRAHMAN e CARPENTER, 1999; LEITE, 1999; SPECHT, 2004; LO PRESTI, 2013; SHI *et al.*, 2013; THIVES *et al.*, 2013; GUO Q. *et al.*, 2014; LI P. *et al.*, 2017; VENUDHARAN *et al.*, 2018).

Para execução do experimento utilizou-se o processo úmido (*wet process*) pelo sistema não-estocável (*continuous blending*), com ligante asfáltico de petróleo (CAP 50/70). As variáveis independentes e descrição dos níveis testados são apresentados na Tabela 19.

<b>Variáveis independentes</b>	<b>Níveis</b>	<b>Descrição Nível</b>
Percentual de Borracha (PB)	2	17,5% ; 25%
Granulometria da Borracha (GB)	2	#30 ; #16
Temperatura de Mistura (TP)	2	180°C ; 200°C
Tempo de Mistura (TM)	2	45min ; 60min

Tabela 19 - Variáveis independentes e níveis de estudo, Fonte: Autor.

Para determinar as variáveis de resposta executou-se os seguintes ensaios: Determinação do Ponto de Amolecimento – Método do Anel e Bola; Determinação da Penetração; Índice de Suscetibilidade Térmica; Densidade e Massa Específica – Método do Picnômetro e Determinação da Estabilidade a Estocagem.

Na Tabela 20 é possível ver a relação de ensaios dos CAP's modificados e o total dos mesmos.

<b>ENSAIOS CAP MOD.</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>n° de ensaios para cada amostra</b>	<b>Total de C/ Ensaio</b>
<b>Penetração</b>	3	36
<b>Ponto de Amolecimento</b>	2	24
<b>Índice de Suscetibilidade</b>	1	12
<b>Densidade e Massa Específica</b>	1	12
<b>Estabilidade à Estocagem</b>	4	48
<b>TOTAL DE ENSAIOS</b>		<b>132</b>

Tabela 20 - Ensaio de CAP modificado, Fonte: Autor

Analisou-se os dados experimentais respeitando as condições das normativas técnicas dos ensaios. A seguir foi verificado o enquadramento em relação a aceitação dos resultados utilizando-se comparações com normas de órgãos de três países: Estados Unidos - *American Society for Testing and Materials* (ASTM); República da África do Sul, - *South African Bitumen Association* (SABITA) e Brasil – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Departamento de Estradas de Rodagem dos estados de São do Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro, e o Departamento de Infraestrutura de Santa Catarina (DEINFRA).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Resíduos de Pneu (Granulado de Borracha)

A borracha moída de pneus inservíveis tem procedência da Indústria Batistella Artefatos de borracha, localizada em Nova Santa Rita – RS. Ela é comercializada em embalagens de 30kg (Figura 7) com distribuição granulométrica entre 0,59 mm e 2,0 mm. Passou-se essa amostragem por análise granulométrica e processo de separação por peneiramento.



Figura 7 – Amostra do saco de borracha. Fonte: Autor

#### 5.1.1 Análise granulométrica

Da amostragem de uma embalagem de 30 kg foram separadas 3 amostras aleatórias de 500g. Em seguida, passou-se as amostras nas peneiras de abertura #16 e #30, para verificar a porcentagem total (em massa) de cada granulometria. Na Figura 8 é apresentado o processo de crivagem da borracha e na Tabela 21 é apresentado o resultado da análise.

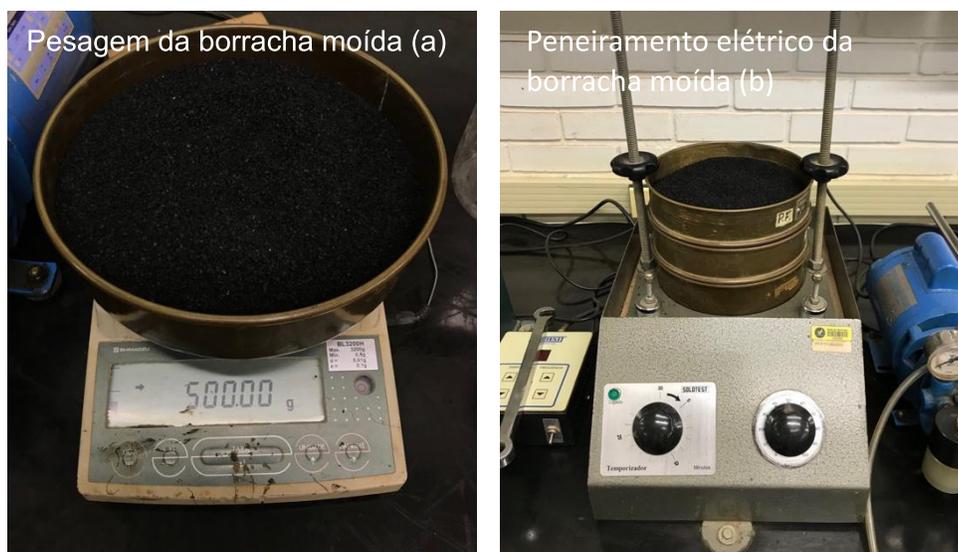


Figura 8 – Processo de análise de percentagem granulométrica das partículas de borracha

Fonte: Autor

ANÁLISE DE PERCENTAGEM GRANULOMÉTRICA DAS BORRACHAS					
Peneiras		Percentagem retida em massa (%)			
n°	mm	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
16	1,19	66	64	55	62
30	0,59	32	29	43	35

Tabela 21 – Análise de percentagem da granulometria no material, Fonte: Autor

A seguir passou-se as amostras na seguinte série de peneiras #10, #16, #30, e #40 para análise granulométrica da % de material retido em cada peneira. O peneiramento foi realizado no laboratório de solos da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS utilizando de um agitador elétrico. Tabela 22 apresenta-se a faixa granulométrica da borracha de pneus inservíveis, analisada na Figura 9 o gráfico da disposição da análise.

ANÁLISE DA FAIXA GRANULOMÉTRICA DAS BORRACHAS					
Peneiras		Percentagem passante em massa (%)			
n°	mm	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
10	2	100	99	100	100
16	1,2	29	32	19	27
30	0,6	2	3	2	2
40	0,42	0	2	1	1

Tabela 22 – Análise de percentagem da faixa granulometria no material. Fonte: Autor.

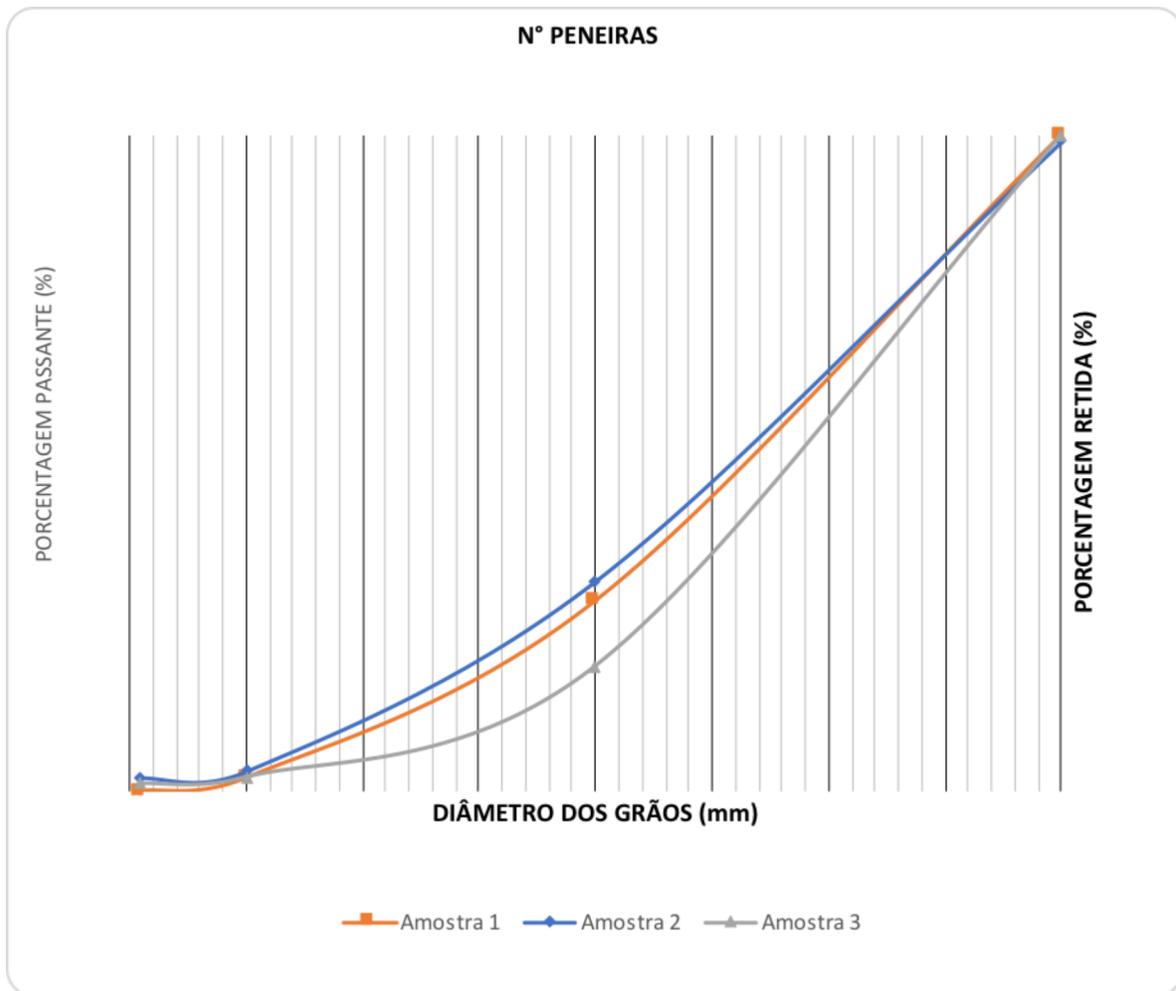


Figura 9 - Análise da porcentagem da faixa granulométrica da borracha. Fonte: Autor

Após a análise da granulometria da borracha, realizou-se um corte a 2 mm (#10) tendo em vista que o tamanho dos grãos de borracha apresenta-se com granulometrias inferiores. Portanto, separou-se por peneiramento elétrico e utilizou-se nas formulações para a produção do ligante asfáltico as granulometrias de #16 e #30. O processo é apresentado na Figura 10.



Figura 10 – Processo de separação das granulometrias da borracha. Fonte: Autor

## 5.2 CAP

Para amostra de referência do ligante asfáltico foi utilizado o CAP 50/70, proveniente do laboratório de solos da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, na Tabela 23 estão às propriedades do ligante convencional utilizada.

ENSAIOS	UNID	CAP 50/70	LIMITES
Penetração a 25°C, 100g	dmm	53	50 a 70
Ponto de Amolecimento	°C	49	46
Índice de Susceptibilidade Térmica	-	-1,3	(-1,5) a (+7)
Massa Específica	g/cm <sup>3</sup>	1,016	-

Tabela 23 – Característica do ligante de referência. Fonte: Autor.

## 5.3 Definições das Formulações e Condições de Trabalho

As formulações e suas variáveis foram definidas através do referencial teórico presente na dissertação qualificada para o PPGEC – Nível Mestrado, analisando a literatura e pesquisas já realizadas e publicadas. As formulações e respectivas variáveis são apresentadas na Tabela 24.

FORMULAÇÕES				
n°	TM (°C)	GB	TP (min.)	PB (%)
1	180	#16	45'	17,5%
2	180	#16	60'	17,5%
3	180	#16	45'	25%
4	180	#16	60'	25%
5	200	#16	45'	17,5%
6	200	#16	60'	17,5%
7	200	#16	45'	25%
8	200	#16	60'	25%
9	200	#30	45'	17,5%
10	200	#30	60'	17,5%
11	200	#30	45'	25%
12	200	#30	60'	25%

Tabela 24 –Formulações e Condições de Trabalho, Fonte: Autor.

#### 5.4 Preparo das Amostras de ligante modificado

Primeiramente aqueceu-se o ligante asfáltico CAP 50/70 até que o mesmo se encontrasse suficientemente fluido para ser trabalhado, geralmente à temperatura de 160°C. Derramou-se o ligante ainda cru, dentro de um recipiente adequado para mistura e pesou-se a amostra, levou-se o recipiente a uma cuba térmica com controle analógico e elevou-se à temperatura correspondente a formulação desejada (180 – 200 °C), monitorando-a com um termômetro. Ao atingir a temperatura desejada ligou-se o agitador para evitar a entrada excessiva de ar na amostra, então adicionou-se as partículas de borrachas da granulometria desejada (#16 e #30), em porcentagem (17,5% e 25%) da massa do peso da amostra de ligante. Misturou-se as amostras com borracha pelos tempos de (45 e 60 min).

Para produção das amostras de ligante modificado com borracha de pneus inservíveis, utilizou-se uma estufa para aquecer o CAP, uma balança onde se passou o CAP referência e a amostra de borracha que seria inserida ao ligante, uma cuba térmica para elevar e manter a temperatura do ligante até a temperatura desejada, um termômetro para monitorar a temperatura e um misturador de asfalto. Na Figura 11 é apresentado o processo de produção.

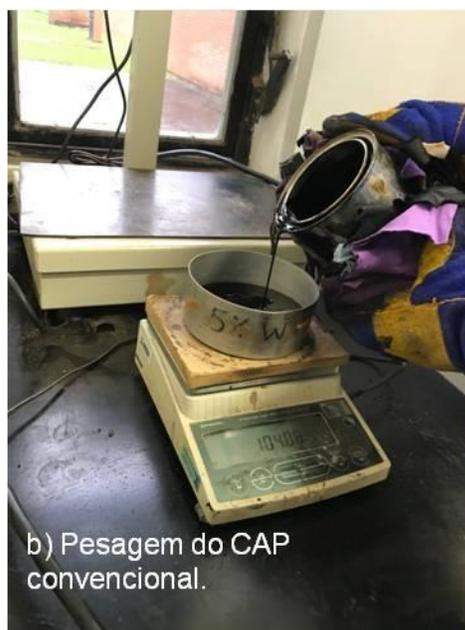




Figura 11 – Processo produção do Asfalto-Borracha. Fonte: Autor

## 5.5 Caracterização das amostras de ligante modificado

A seguir são descritas as técnicas laboratoriais para avaliação dos ligantes modificados com borracha. As determinações dos parâmetros foram realizadas nos laboratórios da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo/RS e da Universidade de Aveiro – Aveiro, Portugal.

### 5.5.1 Determinação da penetração

A penetração é determinada medindo, em décimos de milímetros, a profundidade que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume especificado de cimento asfáltico, durante o período de 5 segundos, à uma temperatura de 25°C. Durante o ensaio, são aferidas três medidas individuais de penetração. Para aceitar a média para os três valores, a diferença entre eles não pode ultrapassar o limite normatizado. A característica de consistência do CAP é inversamente proporcional à penetração da agulha, ou seja, quanto menor a penetração maior será a consistência do CAP (ABNT NBR 6576/07). O processo é apresentado na Figura 12.



Figura 12 – Determinação da Penetração. Fonte: Autor

### 5.5.2 Determinação do ponto de amolecimento – Método Anel e Bola

Método do anel e bola é como é conhecido a determinação do ponto de amolecimento do asfalto. Esse método é normalizado pela ABNT NBR 6560/2000. Neste ensaio se funde a amostra, colocando-a em um molde feito de anel de latão. O molde fica submerso em um banho, de temperatura controlada, e posiciona-se uma esfera feita de aço sobre ele. A amostra é aquecida à temperatura constante fazendo com que o material amoleça dentro do molde e não resista ao peso da bola,

que se movimentara por determinado espaço. O ponto de amolecimento (PA) é determinado pela temperatura lida, que é registrada quando a bola de aço atravessa todo o anel de latão que contém a amostra de ligante, e toca a face de referência depois de ter se deslocado por 25,4mm. Na Figura 13 a seguir, está a realização do ensaio.



Figura 13 – Ensaio de Ponto de Amolecimento. Fonte: Autor

### 5.5.3 Índice de susceptibilidade térmica

A sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura tem como indicativo, a susceptibilidade térmica. Uma característica relevante dos cimentos asfálticos de petróleo é quando um ligante asfáltico é muito sensível à variação de temperatura em relação à mudança de estado ou de características, o que não é recomendado para a pavimentação. É recomendado que o CAP apresente pequenas mudanças das propriedades mecânicas, quanto às temperaturas de serviço, evitando mudanças bruscas de comportamento ao ser submetido a variações de temperatura ambiente (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A normativa do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes número 095/2006) determina o Índice de Susceptibilidade Térmica (IST) pela equação de Pfeiffer e Vann Dormaal, que calcula a partir do Ponto de Amolecimento e da Penetração a 25°C do CAP, e considera que a Penetração do CAP no seu Ponto de Amolecimento é de 80 mm. A equação citada é a seguinte:

$$IST = \frac{(500)(\log PEN) + (20)(T^{\circ}C) - 1951}{120 - (50)(\log PEN) + (T^{\circ}C)}$$

Onde:

T°C = Ponto de amolecimento

PEN = Penetração a 25°C

A normativa do DNIT que classifica o ligante asfáltico convencional estabelece uma faixa de aceitação para o (IST) entre -1,5 e +0,7. Onde valores maiores que (+0,7) indicam asfaltos pouco sensíveis a elevadas temperaturas e quebradiços em baixas temperaturas (asfaltos oxidados). Valores menores que -1,5 indicam asfaltos muito sensíveis a temperaturas.

#### 5.5.4 Densidade e massa específica

A relação entre a massa do ligante a 25 °C e a massa de mesmo volume de água a 4 °C é a densidade do material. A aferição deste parâmetro tem o objetivo de converter unidades gravimétricas em volumétricas e também é utilizado para cálculo do volume de vazios do ligante betuminoso. Já a massa específica é determinada pela relação entre massa e volume do material. A metodologia de ensaio é normatizada pela especificação técnica do ABNT NBR 6296/2004. Na Figura 14 é apresentado o picnômetro utilizado para o ensaio.



Figura 14 – Picnômetro. Fonte: Autor.

### 5.5.5 Estabilidade à estocagem

Através da norma preconizada pela ASTM D 5892, foi analisada a estabilidade à estocagem do ligante modificado com borracha. O método orienta a colocação da amostra líquida do ligante modificado com borracha em um tubo cilíndrico de alumínio, de 2,54mm de diâmetro e 193,7mm de comprimento, fechado em uma das extremidades. Esse tubo é vedado e levado à estufa durante 48 horas à  $163 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ; e em seguida, executam-se ensaios de ponto de amolecimento anel e bola de amostras do topo e do fundo do tubo. A diferença entre as medidas expressas em  $^{\circ}\text{C}$  é o resultado do ensaio.

## 6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios realizados para avaliar as propriedades físicas e mecânicas das amostras de asfalto-borracha preparadas durante a pesquisa.

### 6.1 Determinação da Penetração

Os resultados das determinações estão presentes na Tabela 25. O CAP 50/70 de referência apresentou penetração de 53 décimos de milímetros e o desvio padrão médio entre as triplicatas do teste para a mesma amostra foi de 1,0 décimos de milímetros.

FORMULAÇÕES					Penetração (1/10mm)				
n°	TM (°C)	GB	TP (min.)	PB (%)	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Média	Desvio padrão
1	180	#16	45'	17,5%	28	29	30	29	1,0
2	180	#16	60'	17,5%	30	30	30	30	0,0
3	180	#16	45'	25%	20	19	21	20	1,0
4	180	#16	60'	25%	26	25	24	25	1,0
5	200	#16	45'	17,5%	32	32	30	31	1,2
6	200	#16	60'	17,5%	27	25	26	26	1,0
7	200	#16	45'	25%	23	21	23	22	1,2
8	200	#16	60'	25%	15	15	15	15	0,0
9	200	#30	45'	17,5%	37	35	35	36	1,2
10	200	#30	60'	17,5%	33	33	34	33	0,6
11	200	#30	45'	25%	17	16	17	17	0,6
12	200	#30	60'	25%	27	28	26	27	1,0

Tabela 25 – Resultados dos ensaios de penetração, Fonte: Autor.

É possível observar uma diminuição do valor referente ao parâmetro penetração, ao compararmos o ligante de referência com as amostras de Asfalto-Borracha ensaiadas. Provavelmente, isto se deve ao fato que, a borracha ao sofrer inchaço ao ser incorporada no asfalto, ela aumenta a rigidez e a consistência do ligante. O mesmo foi observado nas pesquisas de LI P. *et al.*, 2017 e VENUDHARAN *et al.*, 2018.

Com base nos resultados apresentados na Figura 15 pode-se compreender como fator principal de interveniência no valor da penetração, a porcentagem de borracha, que quanto maior essa variável maior o aumento do tamanho e da taxa de expansão da partícula de borracha causados pelo fenômeno do inchamento, conseqüentemente maior rigidez e menor penetração (LI P. *et al.*, 2017; VENUDHARAN *et al.*, 2018). Como fatores secundários, verifica-se que existe uma relação entre temperatura e o teor de partículas de borracha incorporado, para que o modificador absorva de forma homogênea os componentes leves do asfalto, e o volume das partículas aumente de acordo com a extensão do tempo de digestão. Por outro lado, a degradação da borracha vai aumentar ao passar de um elevado tempo de digestão, reduzindo o fenômeno de inchamento e aumentando novamente a penetração (SHI *et al.*, 2013; THIVES *et al.*, 2013; LI P. *et al.*, 2017;).

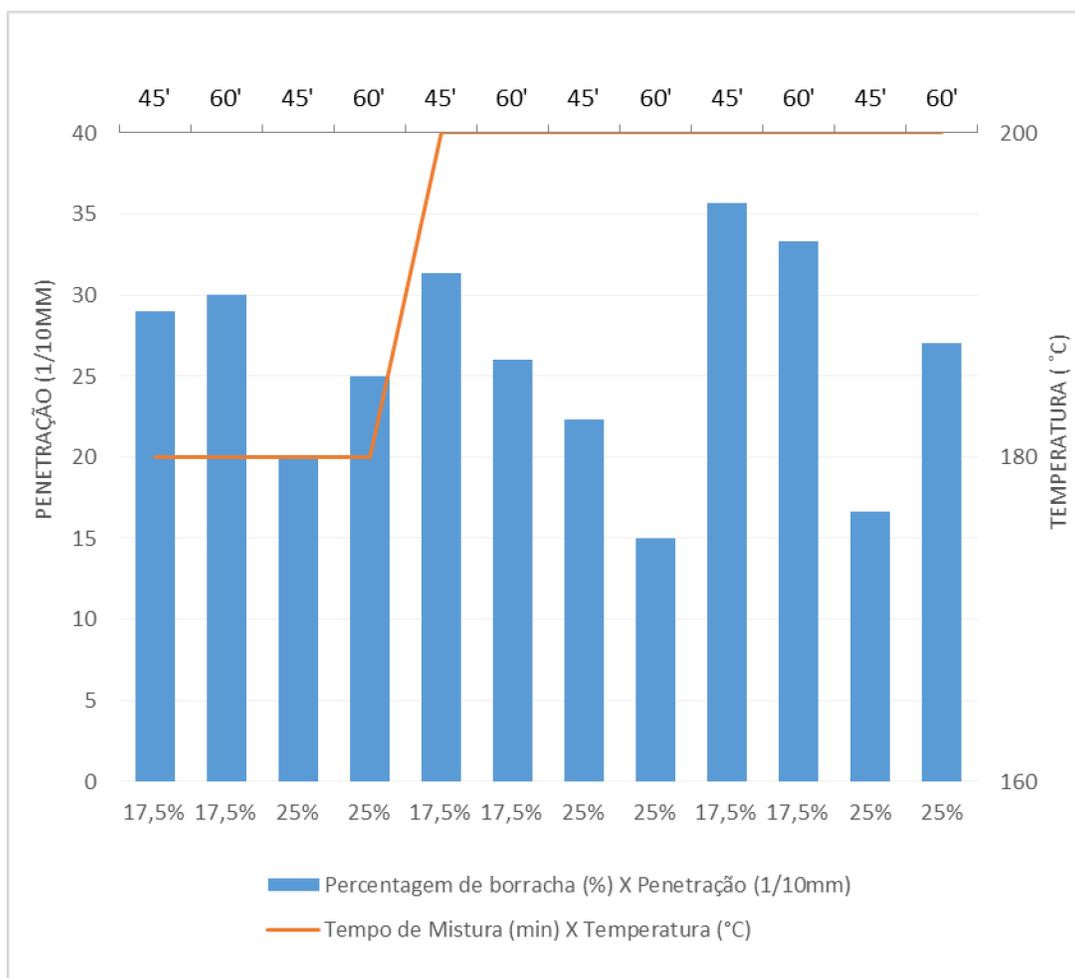


Figura 15 - Relação Percentagem de borracha (%) X Penetração(1/10mm) X Tempo de Mistura(min) X Temperatura de Mistura(C°).

O órgão Estadunidense ASTM, apresenta na normativa ASTM D5 três tipos de Asfalto-borracha, cada um deles tem uma faixa de aceitação para o valor da penetração: Tipo I (25-75dmm); Tipo II (25-75dmm); Tipo III (50-100dmm). No Brasil o órgão federal DNIT, normatiza a faixa do valor do ensaio de penetração entre (30-70dmm), enquanto os órgãos estaduais DER/SP, DER/PR e o DEINFRA/SC apresentam uma faixa de penetração para o Asfalto-Borracha entra (25-75dmm), e o DER/RJ normatiza como limite inferior (15dmm). Na Tabela 26 é apresentada uma relação das formulações de Asfalto-Borracha avaliadas nesse estudo.

FORMULAÇÕES					ESPECIFICAÇÕES							
n°	TM (°C)	GB	TP (min.)	PB (%)	ASTM TI	ASTM TII	ASTM III	DNIT	DER/PR	DER/SP	DEINFRA	DER/RJ
1	180	#16	45'	17,5%	X	X			X	X	X	X
2	180	#16	60'	17,5%	X	X		X	X	X	X	X
3	180	#16	45'	25%								X
4	180	#16	60'	25%	X	X			X	X	X	X
5	200	#16	45'	17,5%	X	X		X	X	X	X	X
6	200	#16	60'	17,5%	X	X			X	X	X	X
7	200	#16	45'	25%								X
8	200	#16	60'	25%								X
9	200	#30	45'	17,5%	X	X		X	X	X	X	X
10	200	#30	60'	17,5%	X	X		X	X	X	X	X
11	200	#30	45'	25%								X
12	200	#30	60'	25%	X	X			X	X	X	X

Tabela 26 – Relação dos resultados e especificações dos órgãos para o ensaio de penetração, Fonte: Autor.

Ao observar a Tabela 26, entende-se que as formulações n° 3, 7, 8 e 11 não estariam enquadradas pela maioria dos órgãos usados para o comparativo e que as formulações n° 1, 2, 4, 5, 6, 9, 10 e 11, teriam uma boa aceitação pela maioria das especificações desses órgãos.

## 6.2 Determinação do Ponto de Amolecimento

O CAP amolece lentamente quando submetido ao aquecimento e não apresenta um ponto de fusão. Com o intuito de determinar uma temperatura equivalente ao ponto de fusão, diversos métodos foram preconizados para determinar a temperatura em que o ligante asfáltico apresenta a mesma consistência. O Ponto de Amolecimento Anel e Bola é um dos mais conhecidos, onde o resultado corresponde a temperatura em que o ligante apresenta viscosidade aparente de 1300Pa.s.

Na tabela 27 estão apresentados os valores para a determinação do ponto de amolecimento, para as amostras ensaiadas. O resultado para o ponto de amolecimento ensaiado do CAP 50/70 de referência foi 49°C. O desvio padrão médio dentre as amostras ensaiadas foi de 1°C.

FORMULAÇÕES					PONTO DE AMOLECIMENTO (°C)			
n°	TM (°C)	GB	TP (min.)	PB (%)	Leitura 1	Leitura 2	Média	Desvio padrão
1	180	#16	45'	17,5%	55,2	56,0	55,6	0,6
2	180	#16	60'	17,5%	55,3	56,2	55,8	0,6
3	180	#16	45'	25%	58,1	60,6	59,4	1,8
4	180	#16	60'	25%	59,0	60,6	59,8	1,1
5	200	#16	45'	17,5%	59,0	60,0	59,5	0,7
6	200	#16	60'	17,5%	60,6	62,0	61,3	1,0
7	200	#16	45'	25%	63,0	64,0	63,5	0,7
8	200	#16	60'	25%	65,0	65,5	65,3	0,4
9	200	#30	45'	17,5%	57,0	59,0	58,0	1,4
10	200	#30	60'	17,5%	57,0	58,5	57,8	1,1
11	200	#30	45'	25%	63,0	65,0	64,0	1,4
12	200	#30	60'	25%	60,0	62,0	61,0	1,4

Tabela 27 – Resultado dos ensaios de ponto de amolecimento, Fonte: Autor.

A determinação do Ponto de Amolecimento está relacionada à deformação plástica no ligante asfáltico e ao resultado da estabilidade e fluência do ensaio Marshall, pois, o Ponto de Amolecimento é inversamente proporcional ao afundamento de trilha de roda, sofrido em um pavimento executado com material asfáltico. Observando os resultados determinados para as amostras de asfalto-borracha, compreende-se que, um ligante modificado por borracha de pneus inservíveis, apresentará uma menor possibilidade da ocorrência de trilha de roda no pavimento, quando sua proporcionalidade inversa é de quanto mais alto o ponto de amolecimento, menor a possibilidade de ocorrer esta patologia (THIVES *et al.*, 2013; GUO *et al.*, 2014; FHWA, 2017; VENUDHARAN *et al.*, 2018).

Analisando a Figura 16, pode-se constatar que o valor do ponto de amolecimento sofre influência da granulométrica da borracha, devido o aumento da superfície específica, exercendo um efeito inversamente proporcional ao resultado encontrado, enquanto, o teor de borracha na formulação tem um efeito diretamente proporcional. O aumento da porcentagem de borracha, do tempo e temperatura de mistura na modificação de ligante, resultam no aumento do ponto de amolecimento, assim como de uma granulometria mais fina, por apresentarem superfície específica maior, absorvendo com mais facilidade os componentes leves do ligante, produz um valor mais alto desse parâmetro. No entanto, a porcentagem de borracha maior que 20%, a temperatura de mistura maior que 195 °C e o tempo de mistura maior que 45

minutos, combinados com uma granulometria fina, podem levar a uma redução na temperatura do ponto de amolecimento (LI T. *et al.*, 2011; THIVES *et al.*, 2013; FHWA, 2017; LI P. *et al.*, 2017; VENUDHARAN *et al.*, 2018).

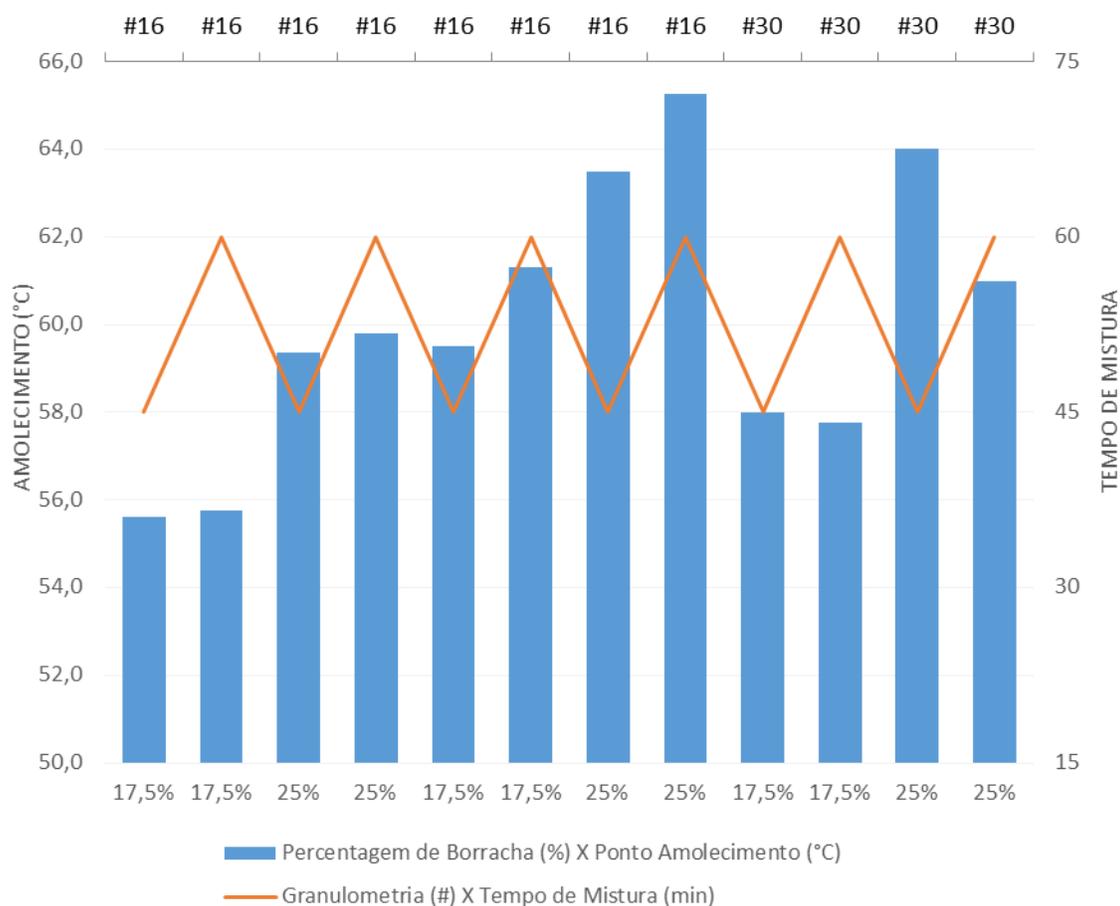


Figura 16 - Relação Percentagem de borracha (%) X Ponto de Amolecimento(°C) X Granulométrica (min) X Tempo de Mistura (Min.).

O órgão Estadunidense ASTM, apresenta na normativa ASTM D36 de três tipos de Asfalto-borracha, cada um deles tem um valor mínimo de aceitação para o ensaio de penetração: Tipo I (57,2°C); Tipo II (54,4°C); Tipo III (51,7°C). No Brasil o órgão federal DNIT e quase todos os órgãos estaduais já citados, com exceção do DER/RJ, normatiza o valor mínimo do ensaio de ponto de amolecimento de 55°C, enquanto o DER/RJ normatiza o valor mínimo sendo de 70°C. A República da África do sul, também apresenta normativa para dois tipos de asfalto-borracha quanto o ensaio de ponto de amolecimento, sendo uma faixa de valor em que o resultado tem que se enquadrar, são eles: S-R1 (55-62°C) E A-R1 (55-65°C). Na

Tabela 28 a seguir, apresenta-se uma relação das formulações de Asfalto-Borracha testadas e o respectivo enquadramento em relação às normativas supracitadas.

FORMULAÇÕES					ESPECIFICAÇÕES									
n°	TM (°C)	GB	TP (min.)	PB (%)	ASTM TI	ASTM TII	ASTM III	A-RI	S-RI	DNIT	DER/PR	DER/SP	DEINFRA	DER/RJ
1	180	#16	45'	17,5%		X	X	X	X	X	X	X	X	
2	180	#16	60'	17,5%		X	X	X	X	X	X	X	X	
3	180	#16	45'	25%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
4	180	#16	60'	25%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
5	200	#16	45'	17,5%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
6	200	#16	60'	17,5%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
7	200	#16	45'	25%	X	X	X			X	X	X	X	
8	200	#16	60'	25%	X	X	X			X	X	X	X	
9	200	#30	45'	17,5%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
10	200	#30	60'	17,5%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
11	200	#30	45'	25%	X	X	X			X	X	X	X	
12	200	#30	60'	25%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

Tabela 28 – Relação dos resultados e especificações dos órgãos para o ensaio de Ponto de Amolecimento, Fonte: Autor.

Nota-se que, as formulações de maior tamanho de partículas e maior teor de borracha apresentaram melhor enquadramento entre as normas, e que nem uma formulação foi capaz de atingir a aceitação da norma do DER/RJ, que normatiza o valor mínimo para o Ponto de Amolecimento como (70°C).

### 6.3 Índice de Susceptibilidade Térmica (IST)

O Índice de Susceptibilidade Térmica preconizado por Pfeiffer e Vann Doormaal, nas normativas brasileiras para asfalto convencional é classificado dentro de uma faixa de -1,5 a +0,7, onde valores superiores a (+0,7) indicam asfaltos oxidados, ou seja, pouco sensíveis a elevadas temperaturas e, quebradiços e frágeis a baixa temperatura. Valores inferiores a -1,5 indicam asfaltos muito sensíveis a elevadas temperaturas, amolecendo muito rapidamente. Os valores encontrados para o IST das amostras de ligantes testadas são apresentados na Tabela 29. O valor encontrado para o CAP de referência foi de (-1,3) e se enquadra ao que preconiza a norma brasileira para asfaltos convencionais.

n°	FORMULAÇÕES				(IST)		
	TM (°C)	GB	TP (min.)	PB (%)	PN	PA	ÍNCICE
1	180	#16	45'	17,5%	29	55,6	-1,1
2	180	#16	60'	17,5%	30	55,8	-1,0
3	180	#16	45'	25%	20	59,4	-1,0
4	180	#16	60'	25%	25	59,8	-0,5
5	200	#16	45'	17,5%	31	59,5	-0,1
6	200	#16	60'	17,5%	26	61,3	-0,2
7	200	#16	45'	25%	22	63,5	-0,1
8	200	#16	60'	25%	15	65,3	-0,5
9	200	#30	45'	17,5%	36	58,0	-0,1
10	200	#30	60'	17,5%	33	57,8	-0,3
11	200	#30	45'	25%	17	64,0	-0,5
12	200	#30	60'	25%	27	61,0	-0,1

Tabela 29 – Resultados para o Índice de Susceptibilidade Térmica, Fonte: Autor.

Como pode-se observar nos resultados da tabela 29, a adição de borracha de pneus no ligante asfáltico para a sua modificação ocasionou o aumento do índice de susceptibilidade térmica em relação ao CAP convencional. Esse fato corrobora com a absorção dos componentes leves do ligante asfáltico pelas partículas de borracha, consequência do inchamento, caracterizando assim, a interação entre os materiais. Os valores do IST, para todos os ligantes modificados testados mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos para asfaltos convencionais. A diminuição da susceptibilidade térmica faz com que, a consistência do ligante modificado permaneça a mesma quando submetido a amplas faixas de temperaturas. Em baixas temperaturas a sua flexibilidade característica pode promover o aumento da resistência às trincas e fissuras na superfície do pavimento. Em elevadas temperaturas, o incremento do ponto de amolecimento reduz o perigo de exsudação de ligante, afundamento de trilho de roda e perda da macrotextura do revestimento (BERTUCCI *et al.*, 2006; RATTANASOM *et al.*, 2007; LIU *et al.*, 2008; SATUCCI, 2009).

#### 6.4 Determinação da Massa Específica

A determinação das propriedades volumétricas de misturas asfálticas tem elevada importância, tanto em nível de projeto como em nível de qualidade do material. Para determinar essas propriedades através do cálculo da densidade

máxima teórica, se faz necessário o conhecimento da massa específica dos componentes da mistura.

A Tabela 30 apresenta os resultados dos ensaios de determinação de massa específica dos ligantes modificados testados.

FORMULAÇÕES					Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
n°	TM (°C)	GB	TP (min.)	PB (%)	Leitura
1	180	#16	45'	17,5%	1,018
2	180	#16	60'	17,5%	1,024
3	180	#16	45'	25%	1,035
4	180	#16	60'	25%	1,045
5	200	#16	45'	17,5%	1,016
6	200	#16	60'	17,5%	1,023
7	200	#16	45'	25%	1,033
8	200	#16	60'	25%	1,037
9	200	#30	45'	17,5%	1,025
10	200	#30	60'	17,5%	1,017
11	200	#30	45'	25%	1,042
12	200	#30	60'	25%	1,052

Tabela 30 – Resultados para ensaio o de Massa Específica, Fonte: Autor.

A partir dos resultados apresentados na tabela 30, pode-se notar o aumento da massa específica em relação ao ligante convencional, que apresentou o valor de 1,016 g/cm<sup>3</sup>. Com a adição da borracha de pneu no ligante asfáltico, já era esperado o aumento desse valor, considerando que a borracha tem uma massa específica maior que o ligante (SPECHT, 2004; LO PRESTI, 2013).

Na Figura 17 é possível observar a influência das variáveis independentes no aumento da massa específica.

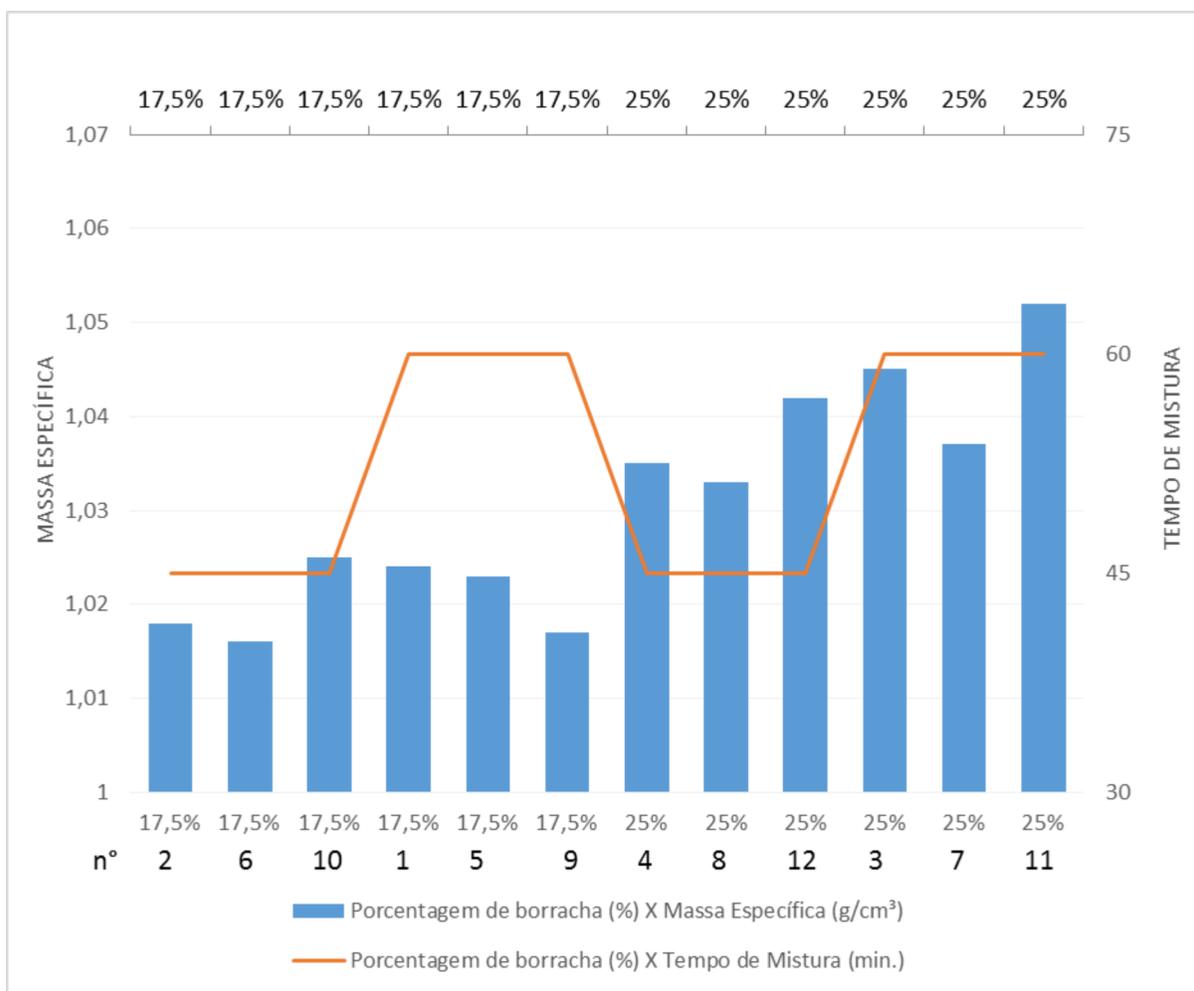


Figura 17 - Relação Percentagem de borracha (%) X Massa Específica (g/cm³) X Percentagem da borracha (%) X Tempo de Mistura (Min.).

A relação do percentual de borracha indicou como fator mais importante intervindo no aumento da massa específica do ligante modificado por borracha de pneus inservíveis, a porcentagem adicionada a cada formulação, em seguida foi à interação entre Percentual de Borracha X Temperatura de mistura.

Apenas os órgãos estaduais brasileiros, DER/PR, DER/SP e DEINFRASC, apresentam normativa para a Massa Específica do ligante modificado por borracha de pneus inservíveis, classificando como aceitável um faixa entre (1,0 e 1,05 g/m³). A seguir na Tabela 31, temos apresentadas as formulações que foram aceitas ou reprovadas pelas normas. Nota-se que apenas uma formulação não foi aceita a de N° 12.

FORMULAÇÕES					ESPECIFICAÇÕES		
n°	TM (°C)	GB	TP (min.)	PB (%)	DER/PR	DER/SP	DEINFRA
1	180	#16	45'	17,5%	X	X	X
2	180	#16	60'	17,5%	X	X	X
3	180	#16	45'	25%	X	X	X
4	180	#16	60'	25%	X	X	X
5	200	#16	45'	17,5%	X	X	X
6	200	#16	60'	17,5%	X	X	X
7	200	#16	45'	25%	X	X	X
8	200	#16	60'	25%	X	X	X
9	200	#30	45'	17,5%	X	X	X
10	200	#30	60'	17,5%	X	X	X
11	200	#30	45'	25%	X	X	X
12	200	#30	60'	25%			

Tabela 31 – Relação dos resultados e especificações dos órgãos para o ensaio de Massa Específica, Fonte: Autor.

## 6.5 Estabilidade à Estocagem

Uma das dificuldades da utilização do asfalto-borracha produzido pelo processo *Continuous Blending* é a separação entre as fases do ligante asfáltico modificado por borracha, que pode ocorrer em dois momentos: no transporte ou na estocagem. Esse fenômeno ocorre devido as diferentes propriedades físicas dos materiais envolvidos na mistura (LO PRESTIS, 2013).

O procedimento utilizado para determinar a Estabilidade à Estocagem utilizado neste trabalho é normatizado pela DNER-ME 384/99 e trata-se de uma referência para avaliar a separação de fases entre o asfalto e o modificador (no caso desta pesquisa a borracha de pneus inservíveis), quando o ligante modificado e estocado sem agitação.

A Tabela 32 são apresentados os resultados para determinação da Estabilidade à Estocagem, executados em amostras dos ligantes modificados produzidos, que ficaram em repouso por 48hrs em estufa a 163°C. Ensaiou-se duas vezes cada amostra, primeiro coletando material do topo e depois do fundo do tubo utilizado para o descanso, a diferença entre os resultados é caracterizada pelo Índice de Compatibilidade (IC). O desvio padrão médio entre as amostras do topo foi de 1,1C° e entre as amostras do fundo foi de 2,5°C.

FORMULAÇÕES					ESTABILIDADE À ESTOCAGEM (°C)				
n°	TM (°C)	GB	TP (min.)	PB (%)	TOPO 1(°C)	TOPO 2(°C)	FUNDO 1(°C)	FUNDO 2(°C)	IC(°C)
1	180	#16	45'	17,5%	78,0	79,0	88,0	92,0	11,5
2	180	#16	60'	17,5%	70,0	75,0	80,0	83,0	9,0
3	180	#16	45'	25%	80,0	81,0	90,0	95,0	12,0
4	180	#16	60'	25%	70,0	90,0	91,0	85,0	8,0
5	200	#16	45'	17,5%	72,5	73,0	79,0	80,0	6,8
6	200	#16	60'	17,5%	73,0	76,0	77,0	82,0	5,0
7	200	#16	45'	25%	68,0	70,0	76,0	79,0	8,5
8	200	#16	60'	25%	79,0	87,0	89,0	90,0	6,5
9	200	#30	45'	17,5%	68,0	69,0	70,0	74,0	3,5
10	200	#30	60'	17,5%	60,0	60,5	62,0	63,0	2,3
11	200	#30	45'	25%	67,0	70,0	71,0	74,0	4,0
12	200	#30	60'	25%	64,0	65,0	65,0	70,0	3,0

Tabela 32 – Resultados dos ensaios de Estabilidade a Estocagem, Fonte: Autor.

Com base nos resultados apresentados na Figura 18 verifica-se a interviência das variáveis independentes sobre os resultados dos ensaios de Estabilidade a Estocagem, para melhor entendimento das condições de trabalho. As formulações foram reordenadas por tempo de mistura em função da temperatura de mistura, elas estão com seu respectivo número da tabela indicado abaixo do tempo de mistura. Já a porcentagem de borracha adicionada às formulações se encontra acima da granulometria. Após análise, é feita uma relação entre os resultados das amostras ensaiadas com os valores de classificação das normas existentes.

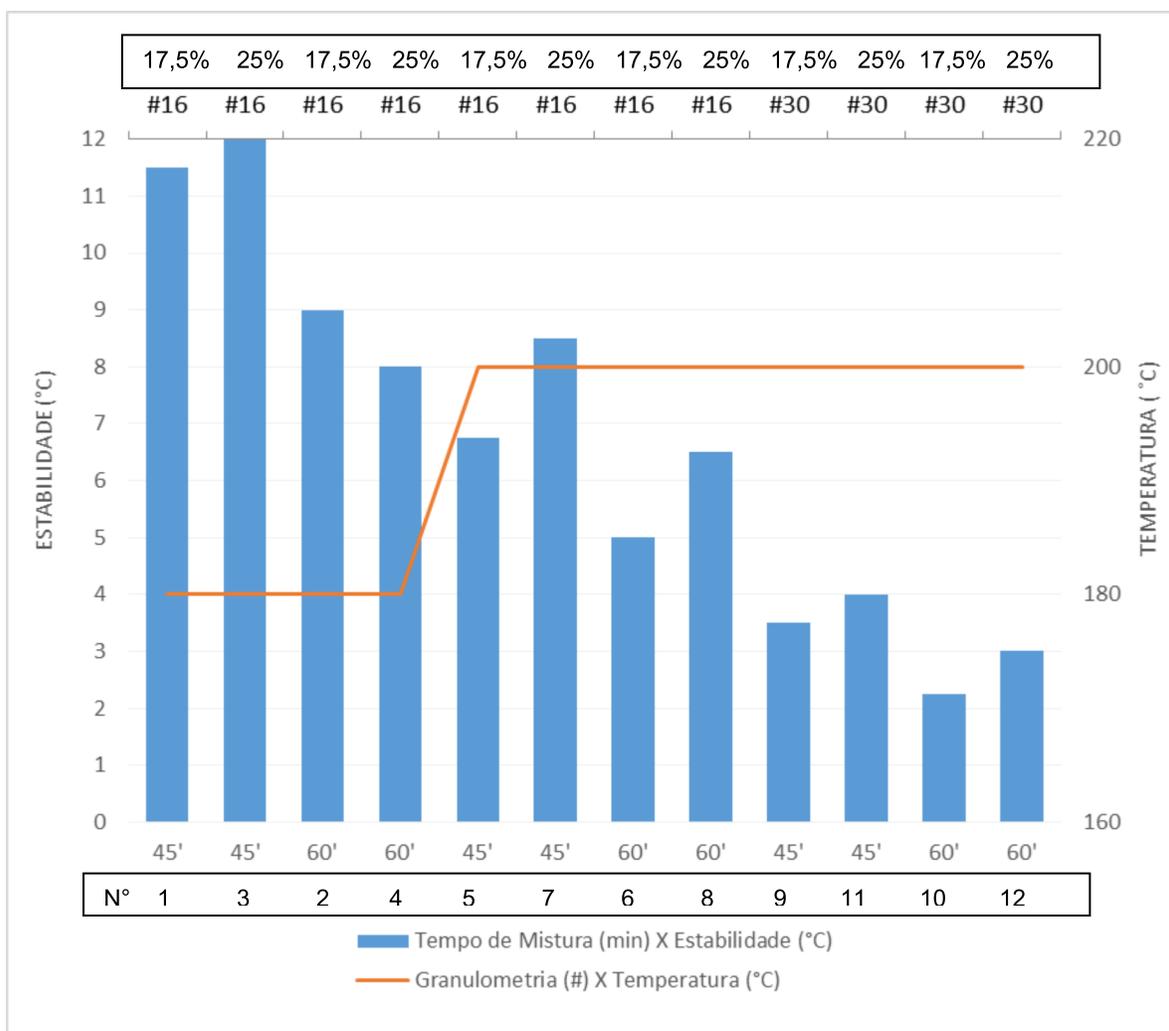


Figura 18 - Relação Tempo de Mistura (min.) X Estabilidade (°C) X Granulometria (%) X Temperatura (°C).

Com base nos resultados apresentados na Figura 18, depreende-se que a interação entre as variáveis granulometria, tempo de mistura e temperatura de mistura tem ação positiva, conferindo melhorias na compatibilidade entre o modificador borracha de pneus e o ligante asfáltico. Essa intervenção se deve ao fato que, quanto menor a granulometria da partícula do agente modificador, maior a sua superfície específica e mais importante se torna o Tempo e a Temperatura de Mistura para uma melhor interação (THIVES *et al.*, 2013; LI P. *et al.*, 2017).

A norma do DNIT, de número 111/2009 estipula um limite máximo de 9°C para o índice de compatibilidade resultante do ensaio de estabilidade a estocagem. A norma se refere a cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo *Terminal Blending*. Ainda que o processo utilizado na pesquisa seja o *Continuous Blending*, ao comparar os resultados obtidos para o

índice de compatibilidade através do ensaio de estabilidade a estocagem para cada formulação posta à prova, nota-se uma boa aceitação quanto ao limite máximo normatizado. As formulações de número 1 e 3 excederam ao limite máximo, o que é compreensível no ponto de vista de que, essas se trata de formulações concebidas com baixa temperatura de mistura e com borracha de maior granulometria, o que dificulta a interação entre os materiais da mistura.

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho de mestrado e as perspectivas de continuidade da pesquisa.

### **7.1 Conclusão**

Este trabalho investigou, através de experimentos, a utilização de partículas de borracha de pneus inservíveis, como modificador em misturas asfálticas. Para a realização da pesquisa testou-se o processo úmido de incorporação das partículas de borracha no ligante asfáltico. Com o qual foram preparados dose formulações diferente de ligantes modificados com borracha moída, caracterizados e avaliados laboratorialmente.

O referencial teórico abordou a importância do tema mundialmente e fundamentou o projeto experimental. O estudo da modificação do ligante asfáltico por partículas de borracha de pneus inservíveis permitiu as seguintes conclusões:

a) Através das determinações de parâmetros tradicionais, constatou-se como fatores intervenientes mais importantes, entre os analisados, Percentual de Borracha, seguido da Temperatura de Mistura e do Tempo de Digestão.

b) A Granulometria da borracha se faz importante quando, partículas de borracha mais fina, apresentam maior superfície conseqüentemente uma maior facilidade de ocorrer interação entre ligante asfáltico e o modificador. No entanto a combinação dos outros fatores, Percentual de Borracha, Temperatura de Mistura e Tempo de Digestão, se faz essencial para uma boa interação.

c) A determinação da Penetração demonstrou que o parâmetro é influenciado basicamente pela Percentagem de Borracha moída adicionada ao ligante asfáltico. Os resultados mostram que há uma relação entre o aumento da

Porcentagem de Borracha e da Temperatura de Mistura efeito de diminuição da Penetração. E que o aumento do tempo de digestão pode causar degradação da borracha e novamente o aumento da Penetração.

d) Os resultados das determinações dos parâmetros indicaram que, possivelmente todas as variáveis pesquisadas causam influenciam perceptível no Ponto de Amolecimento do ligante modificado por partículas de borracha de pneus inservíveis. Em suma a elevação do Ponto de Amolecimento se dá pelo aumento da absorção dos compostos voláteis do ligante asfáltico convencional pelas partículas de borracha existentes. Esta absorção é promovida pelo tamanho da granulometria das partículas de borracha, em relação a sua maior superfície específica, pelo aumento da Temperatura e do Tempo de mistura. Porém, a formulação 12, com Percentagem de Borracha de 25% a uma Temperatura de Mistura de 200°C e Tempo de Digestão de 60min, apresentou uma diminuição do Ponto de Amolecimento, provavelmente provocado pela degradação das partículas de borracha.

e) A determinação utilizada para análise da possibilidade de estocagem do ligante Asfalto-Borracha, realizada nesta pesquisa demonstra a importância desta propriedade no ligante modificado. A Granulometria das partículas de borracha e a temperatura de mistura influenciam de maneira marcante esta propriedade.

f) Após análise de todas as determinações de parâmetros realizadas nesse trabalho, comparando-as com as normativas estudadas, a formulação que apresentou resultados mais aceitáveis foi a de nº 9. De seguinte formulação: Granulometria #30, Percentagem de Borracha 17,5%, Temperatura de Mistura 200°C, Tempo de Digestão 45min.

## **7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como sugestões para continuidade da pesquisa, pode-se indicar:

- a) Determinação dos seguintes parâmetros: Ductilidade e Recuperação Elástica, Envelhecimento a Curto Prazo, Viscosidade Aparente.
- b) Avaliação pelo Grau de Desempenho Superpave.
- c) Verificação da influência da velocidade do rotor, durante a mistura do ligante Asfalto-Borracha.

- d) Determinação das propriedades reológicas, através do DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) e do BBR (*Bending Beam Rheometer*).
- e) Confecção e análise de concreto asfáltico produzido com ligante Asfalto-Borracha.
- f) Construção e monitoramento de trecho executado com concreto Asfalto-Borracha.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELRAHMAN, M.A.; Carpenter, S. H. **Mechanism of interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier**. *Transportation Research Record*, Washington, D.C. 1999. n. 1661, p 106-113.

AGUIAR, A. M. S.; FURTADO, C. F. C. **Aplicação da logística reversa nas revendas de pneus em Fortaleza**. In: SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO, 13, 2010. São Paulo Anais... São Paulo: FEA USP, 2010.

AMERICA SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard specification for asphalt-tubber binder**. D 6114-97. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, p.659-661, 1997.

ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. **Produção e vendas 2015**: dados de produção. Disponível em: [http://www.anip.com.br/arquivos/producao\\_vendas.pdf](http://www.anip.com.br/arquivos/producao_vendas.pdf). Acesso em: 4 nov. 2018.

Asphalt Academy. **The use of Modified Bituminous Binders in Road Construction. Technical Guideline of the South African Asphalt Academy**. TG1. República da África do Sul. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da Penetração de Materiais Betuminosos**: ABNT/NBR 6576. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação do Ponto de Amolecimento de Materiais Betuminosos – Método Anel e Bola**: ABNT NBR 6560. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Produtos betuminosos semissólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa**: ABNT/NBR 6576. Rio de Janeiro, 2012.

Austrroads. (2014). **Specification Framework for Polymer Modified Binders**. AGPT/T190-2014. Pp. 9. Associação de Autoridades de Tráfego e Transporte de Rodovias da Austrália e Nova Zelândia Austrália.

BALAGUER, M. **Avaliação estrutural de um pavimento flexível executado em asfalto-borracha elaborado pelo processo de produção contínua em usina**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

BANDINI, P. **Rubberized Asphalt Concrete Pavements in New Mexico**. Mexico: Department of Civil Engineering of New Mexico State University, 2011.

BERNUCCI, L. B.; LEITE, L.M.; MOURA, E. (2002). **Propriedades mecânicas em laboratório de misturas asfálticas convencionais e modificadas por polímeros**. Em: Encontro do Asfalto, 16,2002, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP, 2002.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA; CERTATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2006). **Pavimentação asfáltica**. Livro. PETROBRAS: ABEDA. Rio de Janeiro, RJ.

BERTOLLO, S. A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo,2002.

Billiter, T.C.; Davison, R.; Glover, C.; Bullin, J. **Production of Asphalt-Rubber Binders in Highw-Cure Conditions**. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board 1586(1):50-56. Washington D.C. Estados Unidos, 1997.

Boulding, M. G.; Collins, J. H.; Berker, A. **Rheology and Micrstructure of Polymer/Asphalt Blends**. *Rubber Chemistry and Technology*, Easton, 1991. v.64, n.4, p.577-600.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, n. 147, p. 3, 03 de agosto de 2010. Seção 1.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 416, de 30 de setembro de 2008**. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. DOU nº188 de 2009.

BUTTON, E.F. Performance of a Tire-Sand Inertial Barrier System in Connecticut – Final Report. **Report N.º FHWA-CT-RD-343-F-77-6**. Connecticut Department of Transportation,1977.

C. Goodyear, **Manner of Preparing Fabrics of Caoutchouc or India-Rubber U.S.** Patent No. 3, 633, 1844.

CALTRANS - State of California Department of Transportation. **Asphalt Rubber Usage Guide**. Sacramento, Califórnia, Estados Unidos. 2003

CALTRANS. **Use of scrap Tire Rubber**. California: State of California Department of Transportation, Materials and Testing Services, Office of Flexible Pavement Materials, 2005.

CAMARGO, F. F. **Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2016.

CAMPB DH, Siwek S, Forestieri F. **How to keep America moving: Report on the US Department of Transportation\_s outreach on reauthorization of the Intermodal Surface Transportation Efficiency Act (ISTEA)**. In: Elles-Boyle A, editor. Office of Governmental Affairs, Washington, DC, 1997.

CNT/SEST/SENAT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRASPORTES, SERVIÇO SOCIAL DO TRANSPORTE E SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM DE TRANSPORTE). **Pesquisa CNT de rodovias 2016: Relatório Gerencial**. – Brasília, 2018, ps. 338-350.

CORBETT L. W. **Composition of asphalt based on generic fractionation using solvent deasphaltind, elution – absorption chronathography and densimetric characterization**. *An Chem.*, Vol 41, p. 576-579, 1969.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO – DER/SP. **Concreto Asfáltico com Asfalto-Borracha (Processo Úmido)**. DER/SP: ET-DE-POO/030. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **Pavimentação: Concreto Asfáltico Usinado a Quente com Asfalto Borracha**. DER/PR: ES-P 28. Curitiba, Paraná, 2005.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRAESTRUTURA DE SANTA CATARINA - DEINFRA-SC. **Camadas de Misturas Asfálticas Usinadas a Quente com Asfalto Borracha**. DEINFRA-SC: ES-P 05B. Florianópolis, Santa Catarina, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero**: DNER – ME 384. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Cimento asfáltico de petróleo – Especificação de material**: DNIT 095. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação Flexível – Cimento Asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de Material**. DNIT 111/2019-EM. Rio de Janeiro, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.. **Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de Serviço**. DNIT DNIT 112. Rio de Janeiro, 2019.

EPPS, A; L.; **Thermal Behavior of crumb-rubber modified asphalt concrete mixture**. Berkeley, 1997. Dissertation (Doctor of Philosophy) – ITS/UCB. 391p.

EPPS, J. A. **Uses of recycled rubber tires in highway, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 198**, Transportation Research Board. Washington, 1994.161p

ETRA, **Introduction to Tyre Recycling: 2016 – Twenty Years of Tyre Recycling in the EU**, The European Tyre Recycling Association, Brussels, 2016.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como extensor em ligantes asfalto-borracha. Tese de Doutorado**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006.

Faxina, A. L. **Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante do tipo asfalto-borracha**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2002

GOOD WILLING, G. e VONK, W.C. – **Shell Chemicals papers. TPE 6.3.2**. 1994.

GUO F., Zhang J, Pei J., Zhou B., Falchetto A. C., Huc Z. **Investigating the interaction behavior between asphalt binder and rubber in rubber asphalt by molecular dynamics simulation**. Construction and Building Materials, V. 252; p. 118956 – 118965. (2020).

GUO Q., L.F. Song, X.Z. Liang, H.X. Chen, **Influence of waste powder amount to performance of different grade of asphalt**, Highway 4 (2014) 194–197.

HASSAN, N. A. **Microstrutural characterisation of rubber modified asphalt mixtures**. Tese de Doutorado. Universidade de Nottingham. Nottingham, Reino Unido, 2012.

HEITZMAN, M. **Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier**. Transportation Research Record. Washington. N. 1265, p. 34-40. 1990.

Heitzman, M. **State of the Practice – Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier**. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-SA-92-022. Estados Unidos, 1992.

Jensen, W. e Abdelrahman, M. **Crumb rubber in performance-graded asphalt binder**. Final Report. SPR-0105. Nebraska Department of Roads, University of Nebraska, Lincoln. Estados Unidos, 2006.

LACERDA, L. **Logística Reversa – uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais**. Revista Tecnológica, P. 45-50 (2002).

LAGARINHOS, C. A. F. (2011). **Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

LANE, K.R. **Instalation of a Sand-Tire Inertial Barrier System in Connecticut**. Connecticut Department of Transportation. Agosto, 1975.

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LI T. G., J.Z. Li, W. Li, **Micro-mechanism study and road engineering application of rubber asphalt**, J. Highway Transp. Res. Dev. V. 28, E. (1). p. 25–30 (2011).

LI, P.; Ding, Z.; Zou P.; Sun, A. **Analysis of physico-chemical properties for crumb rubber in process of asphalt modification**. Construction and Building Materials. V. 138, p. 418–426. (2017)

LUCIANO, Charles Alexandre Anderson, et al. **Pavimento Flexível: Análise Econômica da Aplicação do Asfalto Borracha na BR-163** –Revista Infinity- Revista dos Cursos de Arquitetura e Urbanismo, Engenharia Civil e de Produção. 2017, ps 117 e 118.

M. BARINI, et al., **Construção de estruturas de contenção utilizando pneus inservíveis: análise numérica e caso de obra**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 65(4), 449-457, out. dez. | 2012.

MEMO from S. A. Sabol of NCHRP on *Whole Truck Tires Used as Culvert, based on meedting with C. Bocash of Town of Georgia, Vermont*. 1992.

MORILHA JR, A.; TRICHÊS, G. **Análise comparativa de envelhecimento em Laboratório de nove ligantes asfálticos**. São Paulo: 34<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, 2003.

MORILHA, Junior, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2004

MOTTA, F. G. **A cadeia de destinação dos pneus inservíveis: o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico**. *Ambiente & sociedade*, v. XI, n. 1, p. 167–184, 2008.

N. Rattanasom, et al. **Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler Polym. Test.**, 26 (2007), pp. 369-377

N.F. Medina et al., **Review - Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in construction**. Construction and Building Materials v. 188 p. 884–897, (2018).

Navarro, F.J.; Partal, P.; Marínez-Boza, F.; Valencia, C.; Gallegos, C. (2002). **Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens**. Em: Chemical Engineering Journal. 2002. 89(1-3): 53-61.

NEWCOMB, D. E.; STROUP-GARDINER, M; KIM J. R.; ALLEN, B.; WATTENHOFFER-SPRY, J. **Polymerized crumb rubber modified mixtures in Minnesota**. Department of Civil and Miral Engineering – University of Minnesota anda Minnesota DOT. Maplewood MN/RC 94/08. 1994. 181p.

NGUYEN, M.X., WILLIAMS, J.A. **Implementation Pachage for Using Discarted Tires in Highway Maintenance**. Report N.º CA/TL-89/10. California Department of Transportation, 1989.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2000.

PARRA, C. V.; NASCIMENTO, A. P. B.; FERREIRA, M. L. **Reutilização e reciclagem de pneus, e os problemas causados por sua destinação incorreta**. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2010, São Paulo; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓSGRADUAÇÃO, 10., 2010, São Paulo. Anais eletrônicos... São Paulo: Universidade Nove de Julho, 2010.

PILATI, F. **Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2008.

Q. Liu , et al **Properties of vulcanized rubber nanocomposites filled with nanokaolin and precipitated silica** Appl. Clay Sci. , 42 ( 2008 ) , pp. 232 – 237  
Read, J.M. e Whiteoak, C.D. **The Shell Bitumen Handbook**. 5ª Edição. Londres, Reino Unido, 2003. Thomas Telford Publishing.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; DUNNING, R. L. **Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt**. Auburn: National Center for Asphalt Technology nº 89- 3, 1989.

Robertson, R. E. **Chemical properties of asphalts and their relationship to pavement performance**. Em: SHRP-A/UWP-91-510. Strategic Highway Research Program. Washington, D.C. Estados Unidos, 1991.

ROSTLER, F. S.; WHITE, T. M. **Fraction components of asphalts**. 1959.

SALINI, R.B. **Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC. 120p. 2000.

SANDBERG, U. **Asphalt rubber pavements in Sweden – Noise and rolling resistance properties**. Em: Inter Noise Congress. Lisboa, Portugal, 2010.

SANTUCCI, L. **Rubber Roads: Waste Tires Find a Home**. California: University of California - Pavement Research Center, 2009.

SEST/SENAT – *Serviço Social de Transporte – Serviço Nacional de Aprendizagem de Transporte*. Disponível em: < <http://www.sestsenat.org.br/imprensa/noticia/cerca-de-450-mil-toneladas-de-pneus-sao-descartados-por-ano-no-brasil> > Acesso em: 03 de nov de 2018.

SHEN, J.; XIE, Z.; LI, B. **Comprehensive Evaluation of the Long-Term Performance of Rubberized Pavement: Phase II: The influence of Rubber and Asphalt Interaction on Mixture Durability. Report No.** FHWA-GA-12-1229. Pp. 171. Georgia Department of Transportation, GDOT. Estados Unidos, 2014.

Shi X. Q., Y. Liu, D.X. Wang, Study **of rubber modified asphalt and its properties**, Sci. Technol. Eng. 13 (17) (2013) p. 50-50.

SILVA, Marcelo *et al.* **Viabilidade técnica, econômica e ambiental do asfalto borracha**. Artigo, VIII International Conference on Engineering and Computer Education. Luanda, ANGOLA, 2013.

SOUZA, R. T. **Análise da logística reversa de pneus usados e inservíveis e seus impactos ambientais quando descartados inadequadamente**. Monografia. Tecnólogo em Logística. Faculdade de tecnologia da zona leste. São Paulo. 2009

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

SPREAFICO, P. I. *et al.* **Diagnóstico da Logística Reversa de Pneus Inservíveis na Região Norte do Ceará**. In: III Congresso Nacional de Administração e Ciências Contábeis - AdCont 2012. Disponível em: <http://www.facc.ufrrj.br/ocs/index.php/adcont/adcont2012/paper/viewFile/753/176> > Acesso em: 15 nov. 2018.

THIVES, L. P *et al.* **Assessment of the digestion time of asphalt rubber binder based on microscopy analysis**. Construction and Building Materials V. 47, p. 431–440, 2013.

TORNELLI, A. F. **A importância da reforma de pneus no combate à dengue**. Pneus&Cia, v. 8, n. 51, p. 12–16, 2016.

VELOSO, Z. M. F. **Ciclo de vida dos pneus**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, D.F., 2010.

VENUDHARAN, Veena *et al.* **Investigations on behavioral characteristics of asphalt binder with crumb rubber modification: Rheological and thermo-chemical approach**. Constr. Build. Mater., Volume 181, 30 August 2018, Pages 455-464.

Zaman, A. A.; Fricke, A.L.; Beatty, C.L. **Rheological properties of rubber-modified asphalt**. *Em: Journal of Transportation Engineering*. v.121 (6):461-467, 1995.

Zanzotto, K.; Kennepohl, G.J. **Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt**. *Transportation Research Record*, Washington, D.C, 1996. n. 1530, p. 51-58.