


| | | |
|---|--|---------------------------|
|  | 1. Relatório Número: CCR-ND-AB- RF-DEZ/2017 | |
| | 2. Data do Relatório: Dezembro de 2017 | 3. Páginas: 147 |
| 4. Título da Pesquisa: “Asfalto Borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas” | | |
| 5. Responsável pela coordenação da pesquisa: Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária NovaDutra, do Grupo CCR | 6. Relatório Elaborado para: Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) | |
| 7. Relatório preparado por: Luis Miguel Gutiérrez Klinsky (CPR) Valéria C. de Faria (CPR) | | |
| 8. Resumo: O asfalto borracha é utilizado em atividades de pavimentação asfáltica há aproximadamente 50 anos nos Estados Unidos, e no Brasil sua primeira aplicação foi há mais de 15 anos. Desde seus inícios, seu emprego vem sendo aperfeiçoado, para potencializar os seus benefícios mecânicos nos revestimentos asfálticos. A experiência de diversos projetos ao redor do mundo indica que o concreto asfáltico produzido com asfalto borracha apresenta maior durabilidade, devido à sua maior resistência ao desenvolvimento de trincas por fadiga, trincas por reflexão e menor susceptibilidade térmica, resistindo melhor à deformação permanente. Neste estudo foi realizada uma revisão bibliográfica demonstrando esses benefícios relatados por distintos autores no exterior e no Brasil. Também foi executado um programa laboratorial para verificar as características reológicas do asfalto borracha e os parâmetros mecânicos de misturas asfálticas com este material. Os resultados desse programa laboratorial confirmaram que as misturas asfálticas elaboradas com asfalto borracha tem uma vida de fadiga maior e menor susceptibilidade térmica, quando comparada com misturas asfálticas convencionais. | | |
| 9. Palavras Chave: Misturas asfálticas, ligante asfáltico modificado por borracha, reciclagem | | |

ÍNDICE

| | |
|--|---------------|
| 1. INTRODUÇÃO | - 4 - |
| 2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO (ETAPA A) | - 6 - |
| 2.1. PROBLEMÁTICA DA GERAÇÃO DE PNEUS RESIDUAIS..... | - 6 - |
| 2.2. CARACTERÍSTICAS DOS PNEUS..... | - 8 - |
| 2.3. BENEFICIAMENTO DOS PNEUS..... | - 12 - |
| 2.3.1. Trituração a temperatura ambiente..... | - 14 - |
| 2.3.2. Trituração criogênica..... | - 15 - |
| 2.3.3. Outros processos..... | - 17 - |
| 2.4. HISTÓRICO DO EMPREGO DO ASFALTO BORRACHA EM PAVIMENTOS..... | - 18 - |
| 2.5. REAPROVEITAMENTO DA BORRACHA DE PNEUS EM PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA..... | - 21 - |
| 2.5.1. VIA SECA..... | - 21 - |
| 2.5.1.1. Metodologias..... | - 21 - |
| 2.5.1.2. Características da borracha granulada..... | - 22 - |
| 2.5.1.3. Dosagem de misturas asfálticas com borracha pela via seca..... | - 23 - |
| 2.5.1.4. Processos construtivos..... | - 24 - |
| 2.5.2. VIA ÚMIDA..... | - 25 - |
| 2.5.2.1. Asfalto Borracha nos Estados Unidos e Canadá..... | - 25 - |
| 2.5.2.2. Asfalto Borracha na República da África do Sul..... | - 32 - |
| 2.5.2.3. Asfalto Borracha na Austrália e Nova Zelândia..... | - 36 - |
| 2.5.2.4. Asfalto Borracha no Brasil..... | - 38 - |
| 2.6. CARACTERÍSTICAS DO ASFALTO BORRACHA (AB)..... | - 42 - |
| 2.7. CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO ASFÁLTICO PRODUZIDO COM ASFALTO BORRACHA..... | - 54 - |
| 3. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS (ETAPA B E ETAPA E)..... | - 66 - |
| 3.1. CARACTERIZAÇÃO CONVENCIONAL..... | - 66 - |
| 3.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA..... | - 72 - |
| 3.2.1. Determinação do Grau de Desempenho (PG)..... | - 72 - |
| 3.2.3. Ensaio MSCR..... | - 82 - |
| 3.2.4. Curva Mestre..... | - 89 - |
| 3.2.5. Fadiga pelo parâmetro $G^*sen(\delta)$ | - 95 - |
| 4. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS (ETAPA C E ETAPA E).... | - 97 - |
| 4.1. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS..... | - 98 - |
| 4.2. PARÂMETROS MECÂNICOS..... | - 102 - |

| | |
|--|----------------|
| 4.2.1. Resistência à tração | - 103 - |
| 4.2.2. Dano por umidade induzida | - 106 - |
| 4.2.3. Módulo de Resiliência | - 109 - |
| 4.2.4. Módulo Dinâmico | - 113 - |
| 4.2.5. Ensaio de Flow Number | - 120 - |
| 4.2.6. Ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos..... | - 125 - |
| 5. CONCLUSÕES | - 136 - |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | - 140 - |

1. INTRODUÇÃO

O asfalto borracha é utilizado em atividades de pavimentação asfáltica há aproximadamente 50 anos nos Estados Unidos, e no Brasil sua primeira aplicação foi há mais de 15 anos. Desde seus inícios, seu emprego vem sendo aperfeiçoado, para potencializar os seus benefícios mecânicos nos revestimentos asfálticos. A experiência de diversos projetos ao redor do mundo indica que o concreto asfáltico produzido com asfalto borracha apresenta maior durabilidade, devido à sua maior resistência ao desenvolvimento de trincas por fadiga, trincas por reflexão e menor susceptibilidade térmica, resistindo melhor à deformação permanente.

O objetivo desta pesquisa foi realizar uma extensa revisão bibliográfica do emprego do ligante asfáltico modificado por borracha e desenvolver um programa laboratorial para avaliar suas principais propriedades reológicas e as características mecânicas de misturas asfálticas que fazem uso deste tipo de asfalto.

Para poder atender ao objetivo geral deste estudo foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento de um levantamento bibliográfico do uso do asfalto borracha no Brasil e no mundo, focando nas vantagens que apresenta no desempenho dos pavimentos.
- Execução de um programa laboratorial para analisar as características reológicas do ligante asfáltico modificado por borracha de pneus moídos.
- Realização de um programa experimental para determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas com asfalto borracha. Os parâmetros investigados foram:

a) Resistência à tração (RT);

- b) Dano por umidade Induzida (DUI);
 - c) Módulo de resiliência (MR);
 - d) Módulo Dinâmico (MD);
 - e) *Flow Number* (FN);
 - f) Fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos.
- Desenvolvimento de uma análise estatística dos resultados obtidos para avaliar os resultados obtidos nos programas laboratoriais.

Este relatório final apresenta as atividades desenvolvidas neste estudo. No Capítulo 2 é apresentado o levantamento bibliográfico, desenvolvido a partir da consulta de trabalhos, artigos, dissertações, teses e normas nacionais e internacionais.

No Capítulo 3 apresentam-se os resultados do Programa Laboratorial realizado em nível de ligantes asfálticos, nos quais foram realizados ensaios empíricos tradicionais e ensaios reológicos em quatro ligantes asfálticos modificados por borracha, disponíveis no mercado nacional.

O Programa Laboratorial em nível de misturas asfálticas foi desenvolvido com dois asfaltos borracha comerciais e o CAP 30/45. Os resultados e análise dos ensaios mecânicos e de desempenho executados estão apresentados no Capítulo 4.

O Capítulo 5 resume as principais verificações e conclusões deste estudo.

2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO (ETAPA A)

Nesta etapa foi realizado um levantamento bibliográfico na literatura nacional e no exterior, para entender melhor os tipos de aplicação do asfalto borracha e as principais vantagens mecânicas obtidas por meio do seu emprego na pavimentação asfáltica.

2.1. PROBLEMÁTICA DA GERAÇÃO DE PNEUS RESIDUAIS

O modelo explorador da sociedade moderna, consolidado no final do século XIX, adotou um modelo de desenvolvimento baseado na exploração da matéria prima sem planejamento do seu reaproveitamento no futuro. O emprego desse modelo gerou, ao longo dos anos, níveis de degradação ambiental no mundo inteiro principalmente por ignorar os limites dos recursos naturais.

O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu na década de 1970 com foco na promoção do atendimento das necessidades tomadas por meio de um modelo de gerenciamento dos resíduos, para proteger o meio ambiente e garantir o bem-estar das futuras gerações. Nesse sentido, esse modelo questionou o modelo explorador e a sociedade contemporânea começou a sintonizar suas necessidades com a preservação dos recursos naturais.

No ano de 2010 foi publicada a Lei Federal 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil e estabelece responsabilidades, princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. Segundo essa lei, deve ser atendida a seguinte ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos:

- não geração;
- redução;
- reutilização;
- reciclagem;
- tratamento;
- disposição final ambientalmente adequada.

As atividades humanas produzem inevitavelmente resíduos, portanto, a não geração é uma exigência difícil de atender. Já a disposição final usualmente implica custos elevados que impactam na cadeia produtiva da sociedade. Assim, a reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos são

as atividades mais apropriadas para minimizar o impacto das atividades da sociedade no meio ambiente.

A crescente demanda da produção de carros no Brasil gerou nos últimos anos o incremento da produção de pneus. Nota-se na Figura 2.1 que nos últimos seis anos a produção de pneus no país foi em torno dos 70 milhões de unidades.

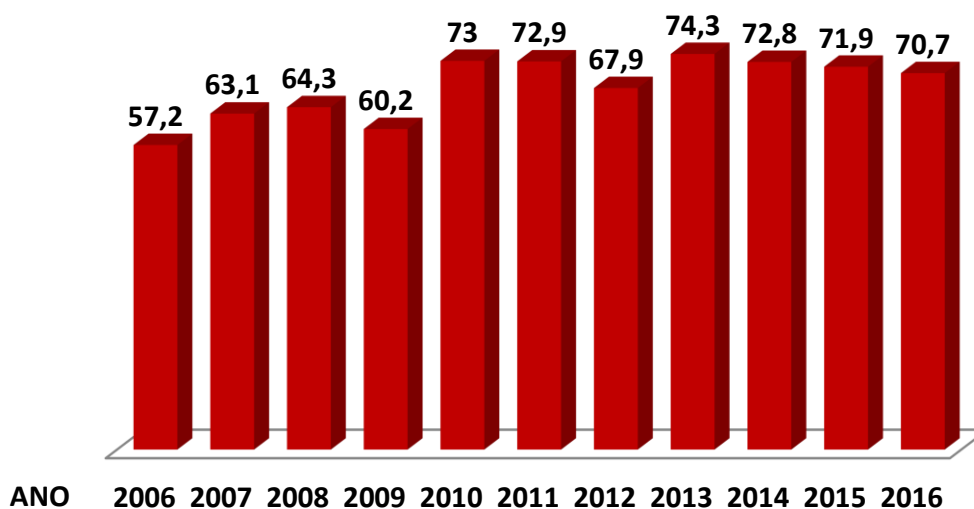


Figura 2.1: Produção de pneumáticos no Brasil, em milhões de unidades.

FONTE: ANIP (2017)

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), no uso de suas atribuições publicou a Resolução N° 416, de 30 de setembro de 2009, na qual dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada e dá outras providências. No seu artigo primeiro especifica que *“os fabricantes e os importadores de pneus novos, com peso unitário superior a 2,0kg (dois quilos), ficam obrigados a coletar e dar destinação adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida nesta Resolução”*.

Tradicionalmente os pneus inservíveis ou residuais eram descartados em aterros sanitários ou eram e ainda são dispostos inadequadamente em locais inapropriados, colocando em risco à saúde da população e gerando locais propícios para incêndios e para o desenvolvimento de parasitos e insetos transmissores de doenças. No entanto, o emprego de aterros sanitários para descarte de pneus inservíveis é cada vez mais difícil, devido à dificuldade de licenciamento de novas áreas para essa finalidade.

No Brasil, é proibida a disposição de pneus residuais em aterros desde 1999, devido à dificuldade de compactação e à redução da expectativa de vida dos aterros (Veloso, 2010). No entanto, essa

proibição associada à falta de incentivo para o reaproveitamento de pneus inservíveis tornou a disposição ilegal de pneus mais frequente. Os riscos da disposição ilegal de pneus inservíveis são o acúmulo desses materiais em aterros, enchentes provocadas por pneus abandonados em rios e córregos, e o risco de incêndios, (Lagarinhos, 2011).

2.2. CARACTERÍSTICAS DOS PNEUS

O pneu é um produto complexo e de alta tecnologia, desenvolvido e melhorado continuamente há mais de cem anos. Suas características são basicamente iguais ao redor do mundo e devem resistir ao processo de fabricação, aos efeitos do calor, raios ultravioletas do sol, aos efeitos da umidade, devem retardar o desenvolvimento bacteriológico, resistir ao ataque de alguns óleos e vários solventes, ácidos e outros químicos, (LoPresti, 2013).

Outras características físicas dos pneus incluem sua não biodegradabilidade, não toxicidade, peso, forma e elasticidade. No entanto, muitas dessas características, desejáveis durante sua vida útil de serviço, tornam-se desvantagens para seu apropriado descarte, criando problemas para sua disposição final, como foi visto anteriormente.

De acordo com Bertollo (2002), o pneu é composto por diversos materiais que visam conferir as características necessárias ao seu desempenho e segurança, dentre as quais se distinguem na Figura 2.2 as seguintes partes:

- a carcaça,
- banda de rodagem,
- talões,
- flancos.

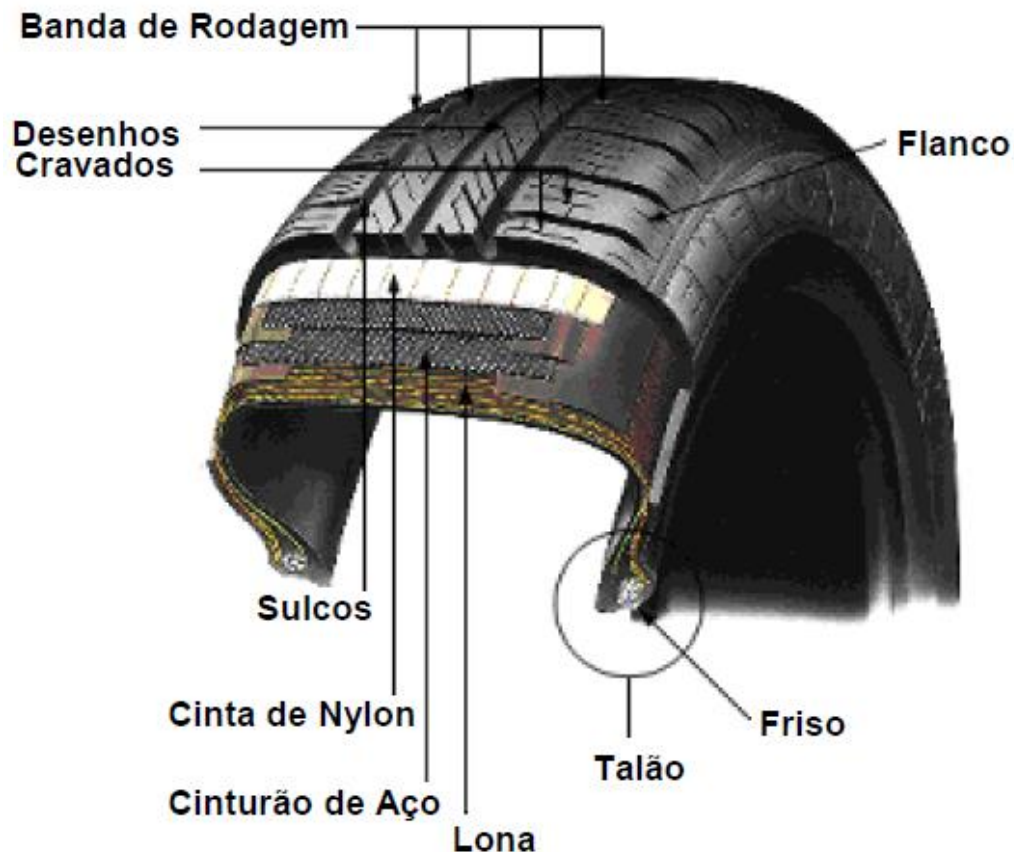


Figura 2.2: Pneu de construção radial. FONTE: BERTOLLO, 2002

A carcaça é a parte resistente do pneu e tem como função reter o ar sob pressão que suporta o peso total do veículo. É constituída de lonas de poliéster, náilon ou aço e nos pneus radiais as cinturas complementam sua resistência, (BERTOLLO, 2002).

A banda de rodagem é a parte do pneu que está em contato direto com a superfície dos pavimentos e é composta por um composto especial de borracha de grande resistência ao desgaste. Seus desenhos (sulcos) oferecem desempenho e segurança ao veículo, melhorando o atrito pneu-pavimento. Os flancos têm a finalidade de proteger a carcaça de lonas e são munidos de uma mistura especial de borracha com elevada flexibilidade. Já os talões, estão conformados internamente com arames de aço de grande resistência e têm a função de manter o pneu acoplado ao aro metálico da roda, (BERTOLLO, 2002).

A borracha que compõe essas partes dos pneus sofre um processo industrial necessário para transformar a borracha natural em um produto de alto desempenho, durabilidade e segurança. A borracha natural é um produto pegajoso, facilmente deformável quando aquecida e de

comportamento quebradiço quando esfriada, conforme é resumido na Tabela 2.1, que não apresenta as características necessárias para compor os pneus por si só, (LoPresti, 2013).

Tabela 2.1: Efeitos da temperatura na borracha natural. FONTE: ETRMA (2011)

| Temperatura (°C) | Características |
|------------------|---|
| -10 | Quebradiça e opaca |
| 20 | Flexível, resiliente e translúcida |
| 50 | Plástica e pegajosa |
| 120 a 160 | Vulcanizada quando enxofre é adicionado |
| 200 | Decomposta |

A borracha natural é altamente deformável devido à sua composição química de longas cadeias de polímeros. Essas cadeias podem se movimentar de forma relativamente independente umas com relação às outras, resultando em mudanças de forma e deformações. Por meio do processo de vulcanização se formam as retículas entre as cadeias de polímeros, de forma que as cadeias não podem mais se movimentar de forma independente. Assim, quando um carregamento é aplicado na borracha vulcanizada, esta irá deformar, mas, quando o carregamento for retirado, a borracha vulcanizada terá a capacidade de voltar à sua forma original, (LoPresti, 2013).

Charles Goodyear descobriu o processo de vulcanização de borracha de forma casual. Durante seus estudos para modificar a borracha de forma que ela resistisse as variações de temperatura, deixou cair sem querer sobre o fogão quente uma mistura de enxofre e borracha. Goodyear notou que a adição de enxofre tornou a borracha mais elástica e resistente, batizou o processo como vulcanização e patenteou esse processo, determinando a temperatura e o tempo de aquecimento ideal.

Atualmente, além do enxofre, outras substâncias podem ser adicionadas à borracha durante a vulcanização, tais como óleo mineral e fíleres de reforço como negro de fumo (*carbonblack*) e sílica (LO PRESTI, 2013). No entanto, os pneus apresentam uma composição de materiais, de acordo com o tipo de veículo no qual são utilizados, conforme apresenta a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Materiais componentes dos pneus de carros, caminhões e ônibus. FONTE: Hassan 2012

| Material | Carro de Passeio | Caminhões/Ônibus |
|---|------------------|------------------|
| Borracha natural | 14% | 27% |
| Borracha sintética | 27% | 14% |
| Negro de fumo | 28% | 28% |
| Metal | 14-15% | 14-15% |
| Fíleres, óleos extensores e antioxidantes | 16-17% | 16-17% |
| Peso aproximado | 10kg | 50kg |

Alguns dos componentes na borracha dos pneus podem ser benéficos à modificação do cimento asfáltico de petróleo (CAP), conforme relata Stephen¹ (1993, apud Hassan 2012):

- **Borracha natural:** constituída de monômeros chamados de isoprenos. Fornece aos pneus elevada elasticidade e excelente resistência física e resiliente, além de resistência à abrasão.
- **Borracha sintética:** este material é obtido pela polimerização de uma mistura de dois ou mais monômeros, como o butadieno e o estireno, obtidos a base de petróleo. A combinação de monômeros produz borracha estireno-butadieno (SBR), amplamente utilizada para melhorar a estabilidade térmica de pneus de carros de passeio.
- **Negro de fumo:** é um produto utilizado principalmente para reforçar a borracha dos pneus. Existem de vários tipos, em função do tamanho das suas partículas e da sua área específica.
- **Fíleres:** Sua principal função é reduzir os custos de produção dos pneus. A maioria dos fíleres são compostos inorgânicos, tais como o carbonato de cálcio (CaCO_3). Sua adição na proporção adequada eleva a rigidez, mas em excesso pode comprometer as características elásticas da borracha. O negro de fumo pode atuar também como fíler em algumas circunstâncias.
- **Óleos extensores:** atuam como plastificantes do polímero da borracha, fazendo o processo mais flexível e fácil. Sua função é oposta à função do negro de fumo, reduzindo a rigidez da borracha.

¹ Stephen, L. R. (1993). *Fundamental principles of polymeric materials (2nd edition)*. Canada: Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc.

- **Antioxidantes ou estabilizadores:** estes agentes são adicionados principalmente a borrachas sintéticas e naturais com elevadas proporções de butadieno e isopreno. Os polímeros da borracha são altamente não saturados e muito suscetíveis ao oxigênio o que pode induzir à fragilidade, trincamento e degradação da borracha. Os antioxidantes têm, portanto, a função de corrigir esse possível comportamento da borracha nos pneus.

2.3. BENEFICIAMENTO DOS PNEUS

O ciclo de vida útil dos pneus é composto de cinco estágios: extração, produção, consumo, coleta de pneus usados e gerenciamento dos resíduos. Uma versão simplificada desse ciclo de vida útil é apresentada na Figura 2.3.

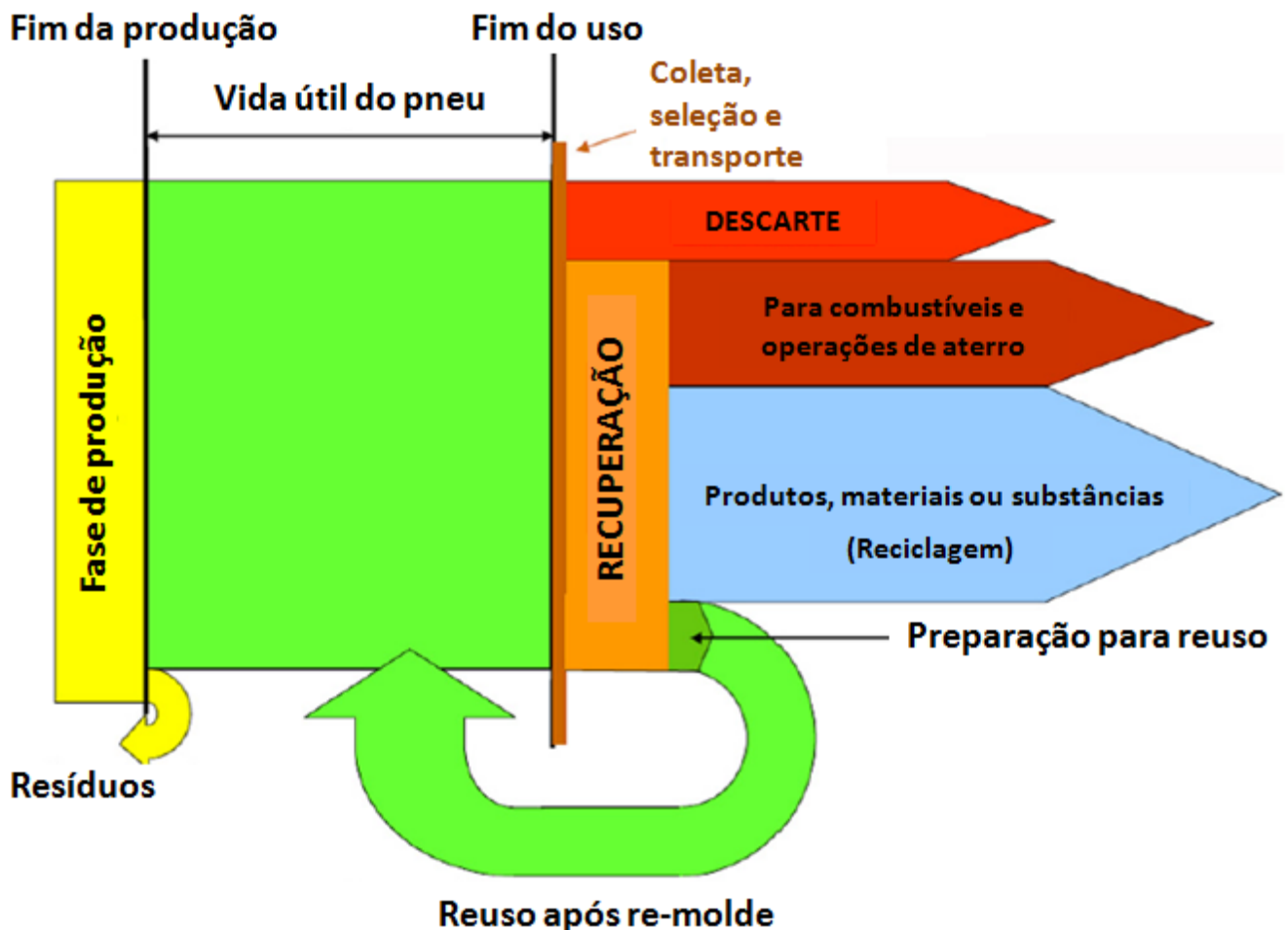


Figura 2.3: Ciclo de vida dos pneus, adaptado de LoPresti (2013)

Após a vida útil do pneu são realizadas as atividades de coleta, seleção e transporte para reuso ou descarte em aterros. Como foi visto anteriormente o descarte não é mais uma alternativa devido

aos elevados custos. Assim, o reuso de pneus é cada vez mais estudado em distintas áreas, conforme citado por LoPresti (2013), por exemplo:

- **Recuperação energética:** nos casos em que o poder calorífico dos pneus é similar ao combustível fóssil empregado em determinada atividade.
- **Processamento químico:** como a pirólise, hemólise e a gaseificação, contudo, nessas técnicas ainda não têm se comprovado viabilidade econômica.
- **Recuperação granular:** envolve a trituração e moagem dos pneus para obter os resíduos com tamanhos específicos a distintas aplicações de reaproveitamento.

Na recuperação granular a borracha é separada do aço e do nylon, para seu emprego em diversas áreas da engenharia civil, tais como: pisos de parques e estádios esportivos, mantas absorventes de impacto, telhados, blocos de pavimentos e pavimentação asfáltica, (LoPresti, 2013). O aço é retirado por equipamentos magnéticos, enquanto que as fibras de nylon são extraídas por processos de aspiração.

O tamanho das partículas de borracha obtidas no processo de recuperação granular por trituração varia de 460mm até 13mm e, processos de moagem permitem reduzir ainda mais o tamanho das partículas até 0,3mm, obtendo assim o pó de borracha moída usualmente utilizada para modificação de ligantes asfálticos (Figura 2.4). Esse processo de moagem é bem controlado nos dias de hoje, de forma a obter pó de borracha moída de alta qualidade. Existem vários processos para poder obter um produto limpo de qualidade consistente, descritos segundo LoPresti (2013) a seguir.



a) Borracha granulada
(1,0 a 4,0mm)



b) Lasca de borracha
(0,85 a 2,36mm)



c) Borracha moída
(0,30 a 0,60mm)

Figura 2.4: Diversos tamanhos de borracha obtidos da trituração e moagem de pneus inservíveis

2.3.1. Trituração a temperatura ambiente

Este método processa a trituração dos pneus em temperaturas comuns do meio ambiente para obter partículas de borracha de forma irregular, com áreas relativamente grande. Neste processo de trituração mecânica são utilizadas lâminas cortantes rotativas, peneiras, cintas transportadoras e equipamentos magnéticos para retirar as fibras metálicas, conforme ilustra a Figura 2.5. Após isolamento das partículas de borracha, é realizada a moagem fina para obter o pó de borracha moída, que apresenta uma área superficial com aspecto esponjoso, como mostra a Figura 2.6a. Esse tipo de trituração é o mais comumente utilizado para reaproveitamento de pneus inservíveis.

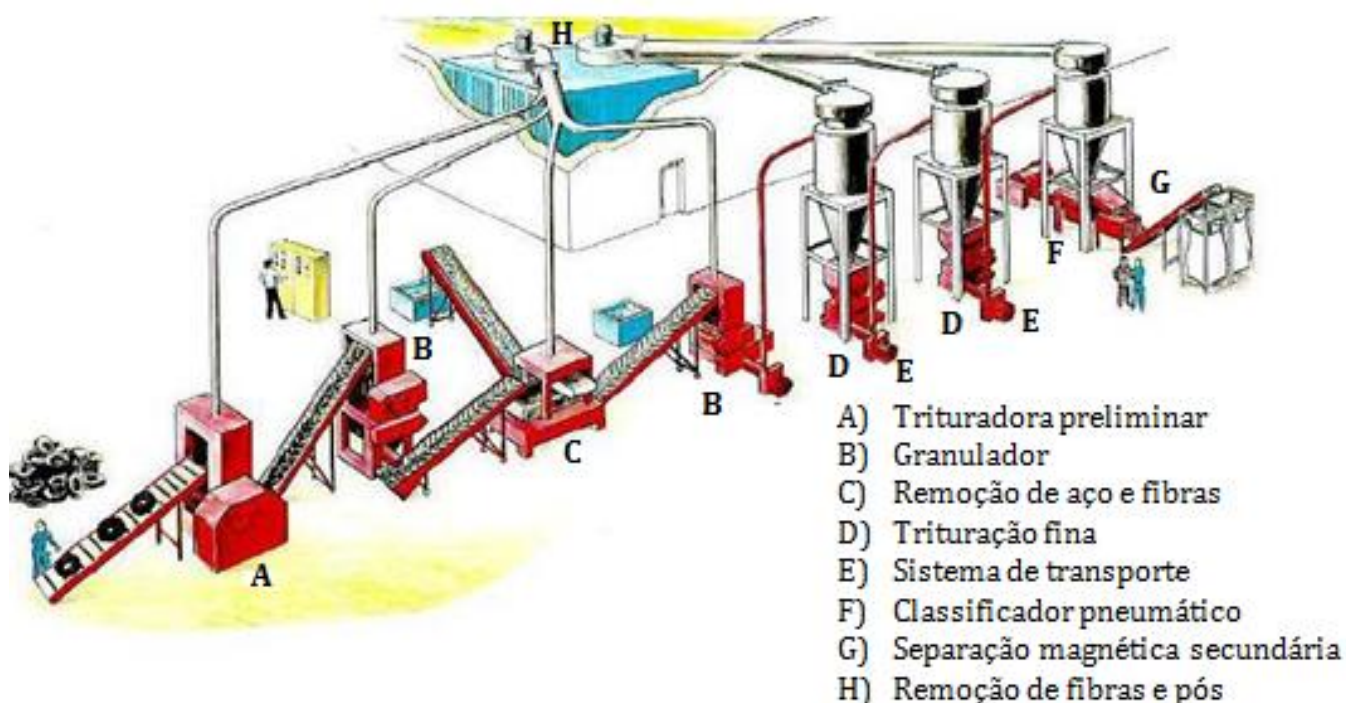


Figura 2.5: Sistema de trituração de pneus inservíveis em temperatura ambiente. FONTE: RESCHNER (2008)

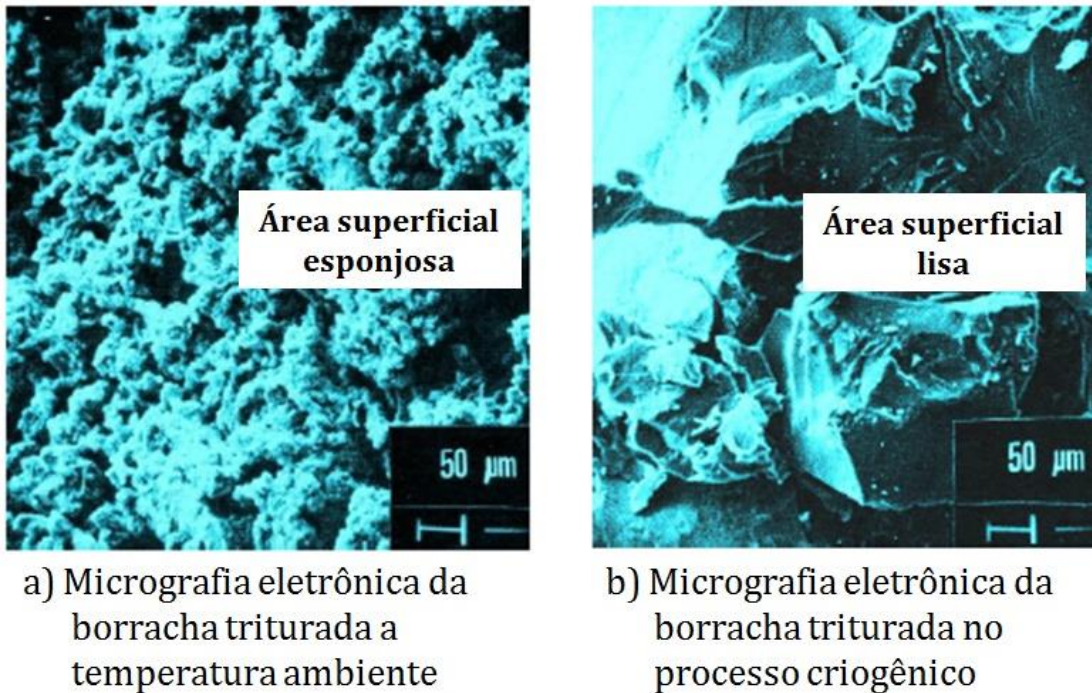


Figura 2.6. Aparência superficial da borracha triturada. FONTE: Oliver² (1981, apud Hasan 2012):

2.3.2. Trituração criogênica

Neste processo é utilizado nitrogênio líquido para congelar os pneus inservíveis, até temperaturas que oscilam de -87°C até -198°C . Nessas temperaturas os pneus tornam-se quebradiços e facilitam a ação de um moinho no qual é acionado um martelo, conforme apresentado na Figura 2.7. No moinho a borracha é quebrada nessas baixas temperaturas e são obtidas partículas lisas e regulares, como mostra a Figura 2.6b, com diâmetros inferiores aos obtidos na trituração a temperatura ambiente, (LO PRESTI, 2013).

²Oliver, J. W. H. (1981). *Modification of paving asphalts by digestion with scrap rubber*. Transportation Research Record 821, Transportation Research Board, Washington, D.C. Estados Unidos.

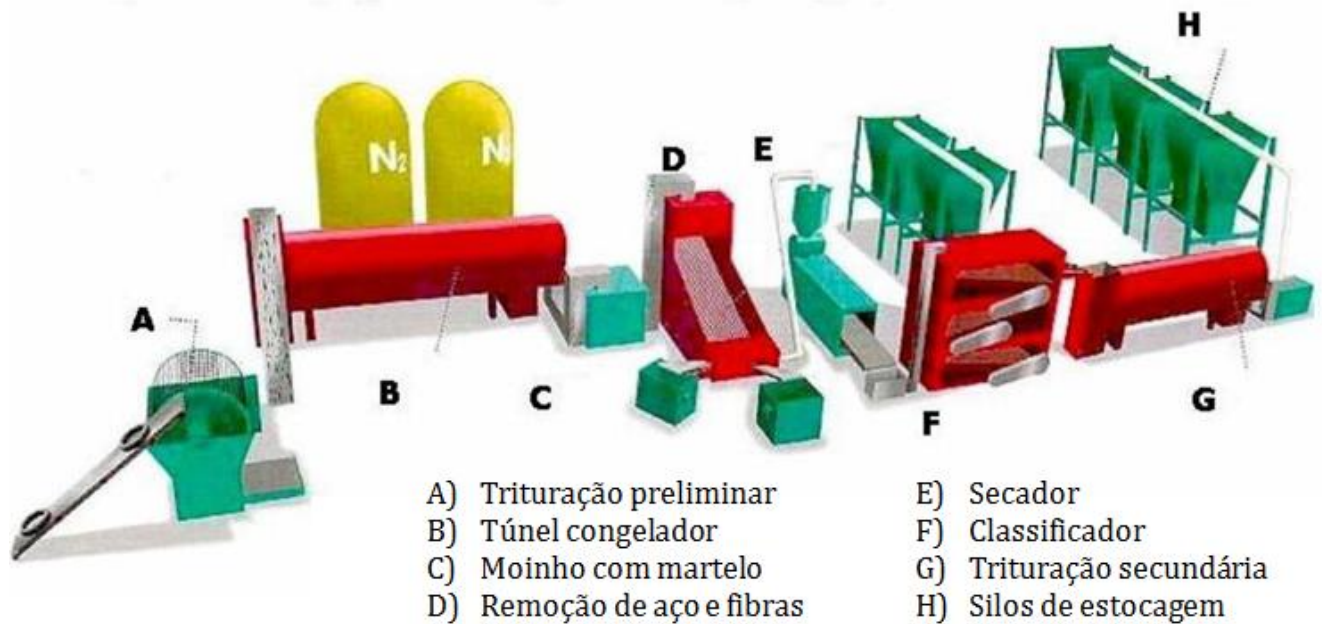


Figura 2.7: Sistema de trituração criogênica de pneus inservíveis. FONTE: RESCHNER (2008)

Estudos de Oliver (1981) mostraram que as características físicas da borracha granulada afetam as propriedades mecânicas das misturas asfálticas que fazem uso de asfalto borracha. No reaproveitamento da borracha no asfalto pela via úmida, as partículas de borracha com superfície lisa têm menor reação com o asfalto e reduzem as características elásticas da mistura, quando comparada com as partículas de borracha com superfície mais esponjosa ou porosa. Dessa forma, o processo criogênico não é recomendado para reaproveitar a borracha com finalidades rodoviárias. Na Tabela 2.3 é apresentado um resumo comparativo do processo criogênico e do processo a temperatura ambiente.

Tabela 2.3: Comparativo do processo de trituração criogênico e a temperatura ambiente. FONTE: LoPresti (2013)

| Propriedade Física | Ambiente | Criogênico |
|--------------------|------------|------------|
| Peso específico | Igual | Igual |
| Forma da partícula | Irregular | Regular |
| Conteúdo de fibra | 0,5% | 0% |
| Conteúdo de aço | 0,1% | 0% |
| Custo | Comparável | Comparável |

2.3.3. Outros processos

Além do processo de trituração criogênica e a temperatura ambiente existem outros métodos menos comuns para obter pó de borracha a partir dos pneus inservíveis, descritos a seguir por LoPresti (2013).

- **Trituração úmida:** é uma técnica patenteada pela qual as partículas de borracha são mais finamente moídas em um meio líquido que usualmente é água. O pó de borracha assim obtido é usualmente empregado como modificador de ligantes asfálticos.
- **Redução por hidro-jateamento:** neste processo a obtenção das partículas de borracha dos pneus inservíveis é realizada com a ajuda de água pressurizada. Jatos de água com pressão de aproximadamente 3.800bar são acionados nos pneus, obtendo-se assim partículas de borracha livres de fibras e aço. Este processo é relativamente novo e ainda não é bem conhecido pela indústria. Contudo, em função da superfície irregular e porosa obtida nas partículas de borrachas (Figura 2.8), pode ser uma técnica atrativa para sua aplicação na modificação de ligantes asfálticos.

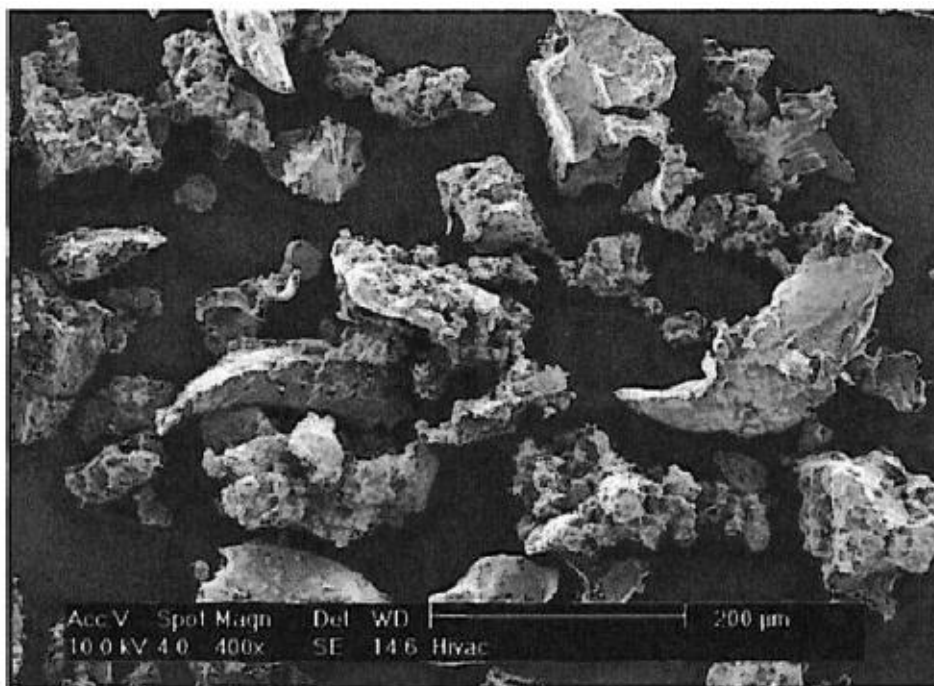


Figura 2.8: Microscopia eletrônica das partículas de borracha obtidas pelo processo de hidro-jateamento. FONTE: LoPresti (2013)

2.4. HISTÓRICO DO EMPREGO DO ASFALTO BORRACHA EM PAVIMENTOS

As primeiras aplicações de materiais asfálticos com borracha, em atividades de pavimentação, datam da década de 1930, quando eram utilizados principalmente como selantes, para execução de reparos de conservação e como membranas. Os engenheiros Lewis e Welborn do *Bureau of Public Roads* (BPR), nos Estados Unidos, realizaram um programa laboratorial para estudar o efeito de 14 tipos de borrachas, incluindo nas propriedades de três asfaltos de petróleo. No estudo se avaliou também o emprego de borracha moída de pneus em misturas asfálticas. A partir desse estudo, o interesse na modificação de asfaltos por borracha cresceu, assim como as patentes da metodologia de modificação, (Caltrans, 2003).

Charles McDonald (Figura 2.9) é considerado nos Estados Unidos o inventor da técnica moderna de asfalto borracha pela via úmida. Esse engenheiro do *Bureau of Public Roads*, durante sua aposentadoria, na década de 1960, trabalhou no Estado da Arizona pesquisando materiais para revestimentos asfálticos que tivessem boa flexibilidade a temperatura ambiente (Way, 2009).

Nessa época, McDonald concluiu que adicionar borracha líquida ao asfalto seria relativamente fácil mas com custos proibitivos e adicionar borracha sólida vulcanizada demandaria elevadas temperaturas do asfalto (superiores a 260°C) para fundi-la. No entanto, o pesquisador notou que quando aquecia o asfalto junto com a borracha, em temperaturas mais baixas, algum tipo de reação acontecia. Durante seus estudos descobriu que a borracha moída de pneus inservíveis era um material de boas características elásticas e baixo custo. McDonald realizou incontáveis ensaios avaliando os efeitos da porcentagem e o tipo de borracha, o tempo e a temperatura de mistura e observou misturas asfálticas com excelentes características, quando submetidas a elevadas temperaturas, (Way, 2009).

As especificações desenvolvidas naquela época por McDonald eram bastante empíricas e simplistas, com aplicações e atividades de conservação em regiões quentes e frias no Estado de Arizona. No entanto, os resultados dos seus ensaios mostravam que era necessário adicionar pelo menos 15% de borracha no asfalto para alcançar viscosidades e elasticidades satisfatórias, com teores ideais de 20 a 25%. Também estabeleceu que a temperatura de 177°C e o tempo de mistura mínimo de 45 minutos seriam necessários para otimizar a produção (Way, 2009). Este processo chamado de “via úmida” foi patenteado por McDonald em 1978. Outra patente na mesma época foi anunciada pela Arizona Refining Company, e ambas expiraram no ano 1995, mas continuam sendo as técnicas mais populares para ligantes asfálticos modificados por borracha.



Figura 2.9: Charles McDonald, inventor do asfalto-borracha, aplicando sua solução *patch-aid* em reparos de pavimentos asfálticos. FONTE: Way, 2009

Nas décadas de 1970 e 1980, o Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans) realizou várias aplicações de asfalto borracha em trechos teste e também como alternativa de restauração em pavimentos deteriorados. Nessas aplicações o asfalto borracha foi utilizado em revestimentos esbeltos com a técnica *chip seal*, em misturas asfálticas densas empregadas para reforço estrutural e também em misturas asfálticas descontínuas (*open graded, gap graded*) usadas como camadas intermediárias para evitar a reflexão de trincas (Caltrans, 2003).

A Caltrans aplicou em mais de 100 projetos a técnica de asfalto borracha até metade da década de 1990. O monitoramento desses projetos indicou o bom comportamento das misturas asfálticas com borracha, que tinham sido apropriadamente projetadas e construídas. No início do século XXI, as aplicações do asfalto borracha se incrementaram no Estado da Califórnia, e se tem dados do ano de 2010 que indicam que aproximadamente 31% de todas as misturas asfálticas utilizam asfalto borracha nesse Estado.

Na Europa o asfalto borracha tem sido também utilizado a partir da década de 1980, na Bélgica, França, Áustria, Holanda, Polônia, Alemanha, Grécia e Reino Unido, com especial destaque para os países de Portugal, Espanha, Itália, República Checa e Suécia, (LoPresti, 2013).

Em Portugal as misturas asfálticas com asfalto modificado por borracha são utilizadas desde o ano 1999, com numerosos estudos desenvolvidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal, (Batista et al, 2006).

Na Suécia desde o ano 2007 a *Swedish Transport Administration* (STA), realizou 15 projetos de pavimentos empregando o asfalto borracha, totalizando mais de 100km de rodovias, com a aplicação principal de redução de ruído nas rodovias próximas a centros urbanos, (Sandberg, 2010).

Austrália e África do Sul começaram a produzir asfalto borracha para concreto asfáltico e para camadas selantes no início da década de 1970 e na década de 1980, respectivamente. Na África do Sul têm sido utilizados os processos da “via seca” e da “via úmida” com sucesso, mas com maior predominância para a “via seca”. Os Estados de *New South Walese Victoria*, na Austrália, adotaram o processo da “via úmida”, para ser aplicado em camadas resistentes ao trincamento, mas prevalecem suas aplicações em camadas selantes, (LoPresti, 2013).

Na atualidade o emprego de asfalto borracha é uma realidade ao redor do mundo, com aplicações também na Ásia, especificamente em Taiwan, China. Em países da América Latina existem algumas experiências recentes com trechos experimentais na Colômbia, Argentina, Uruguai e Chile. No entanto, o Brasil já utiliza em grandes proporções o asfalto borracha desde o início do milênio.

Segundo Bernucci et al. (2008), a primeira aplicação de concreto asfáltico com asfalto borracha foi feita em agosto de 2001 na Rodovia BR-116/RS. Após quase quinze anos dessa aplicação, muitos trechos foram construídos, recuperados ou restaurados utilizando o asfalto borracha, muitos deles com sucesso, mas também alguns com dificuldades. Desde então foram realizadas muitas pesquisas pelos centros de pesquisas nas Universidades Brasileiras (Oda, 2000; Bertollo, 2002; Specht, 2004; Morilhas, 2004; Patriota, 2004; Dias, 2005; Faixa, 2006; Balaguer, 2012; Camargo, 2016) e também pelo setor industrial de asfaltos.

2.5. REAPROVEITAMENTO DA BORRACHA DE PNEUS EM PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

A borracha recuperada dos pneus inservíveis pode ser aproveitada, como foi visto anteriormente, na produção de misturas asfálticas. A incorporação da borracha pode ser realizada por meio de dois processos: via seca e via úmida. Esses processos são descritos com maior detalhe a seguir.

2.5.1. VIA SECA

No processo de reaproveitamento pela via seca, as partículas de borracha substituem parte dos agregados pétreos que, com a adição do ligante asfáltico, formam um produto denominado “concreto asfáltico modificado com adição de borracha”, (Bertollo, 2002).

2.5.1.1. Metodologias

Segundo Shen et al. (2014), na atualidade existem três metodologias de aplicar este processo na produção de misturas asfálticas, descritas a seguir.

PlusRide® Technology

Esta tecnologia foi patenteada em 1950 e consiste no emprego de 1 a 3% de borracha granulada na mistura asfáltica. A borracha é adicionada no misturador da usina de asfalto de forma simultânea aos agregados minerais e após misturação a seco é injetado o ligante asfáltico. As partículas de borracha têm diâmetro variável de 2,0mm até 4,2mm. O volume de vazios alvo nessas misturas asfálticas é de 2,0 a 4,0%, o que usualmente demanda teores de ligante asfáltico de 7,5 até 9,0%. Estas misturas asfálticas empregam usualmente uma granulometria descontínua para melhorar a estabilidade.

Genérica (Generic System)

Este procedimento foi desenvolvido no final da década de 1980 e início da década de 1990 e também é conhecido como sistema TAK. A borracha é utilizada na proporção de até 3% em peso com relação à massa total da mistura asfáltica. As partículas de borracha empregadas são de uma granulometria mais fina, com diâmetros de 0,18mm até 2,0mm, de forma que possa ocorrer modificação parcial do ligante asfáltico adicionado. As granulometrias das misturas asfálticas podem ser densas ou descontínuas, do tipo *gap graded*.

Chunk Rubber

Esta metodologia foi desenvolvida pelo Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos (USACE), no Laboratório de Pesquisas de Engenharia de Região Fria (CRREL), no final da década de 1970 e início da década de 1980. O propósito da USACE foi avaliar as características de desagregação de misturas asfálticas atribuídas às temporadas de congelamento. Neste processo, as partículas de borracha têm diâmetros de 4,75mm até 9,5mm, e as granulometrias das misturas asfálticas devem ser ajustadas para que os agregados minerais deixem espaço suficiente para essas partículas de borracha. Não existem projetos de campo que tenham avaliado o emprego dessa técnica.

2.5.1.2. Características da borracha granulada

A granulometria das partículas de borracha granulada precisa de especial atenção no processo de reaproveitamento pela via seca. Cada metodologia da via seca especifica graduações ideais para a modificação das misturas asfálticas com borracha, conforme apresentado nas Tabelas 2.4, 2.5 e 2.6.

Tabela 2.4: Faixas granulométricas especificadas para a tecnologia PlusRide®. FONTE: Hassan (2012)

| Peneira (mm) | Porcentagem que passa (%) | | |
|---------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|
| | 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 2.4: Faixas granulométricas especificadas para a tecnologia genérica. FONTE: Hassan (2012)

| Peneira (mm) | Porcentagem que passa (%) | | |
|--------------|---------------------------|---------------|-------------|
| | 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 |
| 2,360 | 32-67 | 28-58 | 23-49 |
| 0,300 | 7-23 | 5-21 | 5-19 |
| 0,075 | 2-10 | 2-10 | 2-8 |

2.5.1.3. Dosagem de misturas asfálticas com borracha pela via seca

Segundo a FHWA (2016), a dosagem de misturas asfálticas com borracha pela via seca tem sido realizada pela metodologia Marshall de forma satisfatória, para faixas granulométricas densas. No entanto, o objetivo principal nestas misturas não é alcançar uma determinada estabilidade, mas projetar uma mistura asfáltica com volume de vazios de 2,0 a 4,0%. Esses valores tendem a ser mais baixos dos usualmente empregados, com o intuito de compensar a adição de borracha e as mudanças que isto provoca nas propriedades volumétricas da mistura asfáltica, atribuídas ao baixo peso específico das partículas de borracha granulada.

Na dosagem laboratorial as partículas de borracha granulada são consideradas como um agregado, e devem ser misturadas com os agregados minerais pré-aquecidos, de forma prévia à adição do ligante asfáltico. Antes da compactação, a mistura deve ser conservada solta durante pelo menos uma hora. A parcela de borracha fina reage nesse tempo com o ligante asfáltico de forma parcial, o que é evidente pelo aumento de volume da mistura.

Depois de transcorrido o tempo de estocagem na condição solta, a mistura é compactada de forma convencional e os corpos de prova são resfriados até temperatura ambiente, para posterior extrusão e determinação do volume de vazios. Os teores de ligante asfáltico de projeto tendem a ser de 10 a 20% maiores, quando comparados com misturas asfálticas convencionais. Apesar de

considerar principalmente o volume de vazios como critério de projeto, vale notar que os valores de estabilidade e fluência tendem a ser inferiores aos usualmente observados em misturas asfálticas com ligantes asfálticos convencionais, (FHWA, 2016).

2.5.1.4. Processos construtivos

Usualmente, a borracha granulada é comercializada por indústrias beneficiadoras dos pneus inservíveis e pequenos ajustes devem ser realizados nas usinas de asfalto para introduzir este resíduo na composição das misturas asfálticas. A produção destas misturas asfálticas com borracha pela via seca pode ser realizada em usinas de asfalto volumétricas como gravimétricas. As usinas gravimétricas têm a vantagem sobre as volumétricas de poder controlar o peso exato de partículas de borracha adicionadas ao concreto asfáltico. Uma forma de realizar esse controle é pela adição da borracha em sacos plásticos que derretem em altas temperaturas, (FHWA, 2016).

O controle da quantidade exata de borracha é fundamental para obter um concreto asfáltico de alto desempenho. Esse controle é mais difícil de ser realizado em usinas volumétricas pela forma em que é realizada a alimentação dos materiais. No entanto, existem funis ou *hoppers* que podem ser acoplados nas usinas volumétricas para controlar o fluxo de entrada das partículas de borracha na mistura asfáltica, como mostra a Figura 2.10.



Figura 2.10: Sistema de alimentação de asfalto em usina volumétrica. Fonte: Hines (2007)

Tanto na usina gravimétrica como na volumétrica é necessário incrementar o tempo e a temperatura de mistura, oscilando de 149°C até 177°C. No caso das usinas gravimétricas é necessário garantir o pré-aquecimento dos agregados e sua mistura eficiente com as partículas de borracha, previamente à adição do ligante asfáltico.

De acordo com Specht (2004), a experiência Sul-africana recomenda que após a mistura da borracha com o agregado pré-aquecido (200-210°C) e com o ligante asfáltico (140-160°C) a mistura deve ficar estocada a 180°C por no mínimo uma hora antes da utilização. Esse tempo, chamado de digestão, é necessário para interação entre o ligante e a borracha granulada e influencia diretamente no desempenho da mistura asfáltica final. Existem relatos que indicam problemas de desagregação da mistura na pista quando o tempo de cura não é considerado.

A temperatura de compactação não deve ser inferior a 121°C e a compactação final deve ser realizada até que a mistura asfáltica alcance a temperatura de 60°C. Se esse procedimento não for seguido, corre-se o risco de que em altas temperaturas a reação da borracha com o asfalto continue se desenvolvendo, provocando expansão da mistura asfáltica. Assim, a compactação contínua até temperaturas mais baixas ajuda a conter o poder expansivo da borracha, (Epps, 1994).

2.5.2. VIA ÚMIDA

No processo de reaproveitamento pela via úmida, partículas finas de borracha são misturadas ao ligante asfáltico aquecido, produzindo um novo tipo de ligante, denominado “asfalto-borracha”. Essa metodologia pode ser atribuída a Charles McDonald, como foi citado anteriormente, que observou os benefícios de incremento de elasticidade e viscosidade do ligante asfáltico a elevadas temperaturas, o que leva à formação de uma película mais espessa nos agregados sem riscos de escorrimento do ligante asfáltico nem de exsudação no revestimento asfáltico.

Diversos países ao redor do mundo utilizam o asfalto borracha pela via úmida, cada um com as suas normativas e metodologias específicas. A seguir são descritos os procedimentos recomendados nos Estados Unidos, na República da África do Sul e Austrália, conforme foi resumido por LoPresti (2013).

2.5.2.1 Asfalto Borracha nos Estados Unidos e Canadá

De acordo com a ASTM D6114 o asfalto borracha é uma mistura de ligante asfáltico com pó de borracha moída, na proporção de pelo menos 15% em peso, e certos aditivos, sendo que a borracha reage com o ligante asfáltico o suficiente para causar a expansão das partículas de borracha.

O pó de borracha moída deve atender algumas características para poder ser utilizado como modificador de ligantes asfálticos, de acordo com a ASTM D6114:

- umidade inferior a 0,75% e flutuação livre;

- massa específica de $1,15 \pm 0,05$;
- 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.

Cada estado norte americano tem as próprias recomendações para o emprego de pó de borracha moída na modificação dos ligantes asfálticos, de acordo, em alguns casos, com a granulometria da mistura asfáltica que será utilizada. Nas Tabelas 2.5 a 2.12 são apresentadas algumas especificações dos principais Departamentos de Transportes (DOT) dos Estados Unidos e do Canadá.

Tabela 2.5: Especificações do Ministério de Transportes de Ontário, Canadá, para o pó de borracha usado pela via úmida no processo *fieldblend*

| 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 2.6: Especificações do Ministério de Transportes de Ontário, Canadá, para o pó de borracha usado pela via úmida no processo *terminal blend*

| Especificações | Granulometria | Aditivos | Outros |
|---|---|----------|------------------------|
| → 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 2.7: Especificações do Departamento de Transportes da Arizona, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida

| Especificações | Granulometria | Aditivos | Outros | |
|---|--------------------------------------|--------------|--|-----|
| → Borracha de pneus inservíveis de carros, caminhões ou qualquer veículo dos Estados Unidos | Para Gap Graded e Open Graded | | 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 | | | |
| | Para ChipSeals | | | |
| | 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 2.8: Especificações do Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans), Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida

| Especificações | Granulometria | | Aditivos | Outros |
|--|-----------------------------|--------------|----------|--|
| → Combinação de borracha de pneus e borracha natural | Da borracha de pneus | | | Pode ser acrescentado 3% de carbonato de cálcio ou talco |
| | Peneira (mm) | Passante (%) | | |
| Min | | Max | | |
| → Trituração de pneus a temperatura ambiente | 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 | |
| | Da borracha natural | | | |
| | 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 2.9: Especificações do Departamento de Transportes do Texas, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida

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

Tabela 2.10: Especificações do Departamento de Transportes da Flórida, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida

| Especificações | Granulometria | | Aditivos | Outros | |
|--------------------------------------|---------------|--------------|----------|--|---|
| | "A" | | | | |
| → 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% |
| | | Min | Max | | |
| → Livre de contaminantes | 0,30 | 100 | 100 | | → Hidrocarbonetos: 40 a 55% |
| → Seca | 0,15 | 50 | 80 | | |
| | "B" | | | | |
| | 0,60 | 100 | 100 | | → Cinzas: máximo de 8% de negro de fumo |
| | 0,30 | 40 | 60 | | → Borracha natural de 16 a 45% |
| | "C" | | | | |
| | 1,18 | 100 | 100 | | |
| | 0,60 | 70 | 100 | | |
| | 0,300 | 20 | 40 | | |

Tabela 2.11: Especificações do Departamento de Transportes de New Jersey, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida

| Especificações | Granulometria | | Aditivos | Outros |
|--|---------------|--------------|----------|--|
| | "A" | | | |
| → 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 | |
| → Borracha de pneus de carros, caminhões ou outro equipamento dos Estados Unidos | 1,18 | 65 | 100 | |
| | 0,60 | 20 | 100 | |
| | 0,30 | 0 | 45 | |
| | 0,075 | 0 | 5 | |

Tabela 2.12: Especificações do Departamento de Transportes de Massachusetts, Estados Unidos, para o pó de borracha usado pela via úmida

| Especificações | Granulometria | | Aditivos | Outros |
|--|---------------|--------------|----------|---------------------------------------|
| | "A" | | | |
| → Borracha vulcanizada triturada em temperatura ambiente | Peneira (mm) | Passante (%) | | Até 4% em peso de carbonato de cálcio |
| | | Min | Max | |
| | 2,36 | 100 | 100 | |
| | 2,00 | 95 | 100 | |
| | 0,60 | 0 | 10 | |
| | 0,300 | 0 | 5 | |

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 2.13.

Tabela 2.13: Especificação de asfalto borracha segundo a ASTM D6114

| 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 |

O pó de borracha moída é adicionado ao ligante asfáltico a elevadas temperaturas, usualmente superiores a 177°C, com baixa taxa de cisalhamento, para promover interação física entre o ligante asfáltico e os constituintes das partículas de borracha, (Shatanawi, 2008). Vários destilados de petróleo e óleos extensores podem ser adicionados na taxa de 2,5% até 6%, com relação à massa de ligante asfáltico, com o objetivo de reduzir a viscosidade, facilitar o espargimento e promover trabalhabilidade.

Os equipamentos e sistemas, empregados para homogeneização do asfalto com a borracha, são basicamente os mesmos para as diversas tecnologias, com pequenas variações de uma processadora para outra, mas basicamente os componentes são introduzidos em unidades misturadoras de alto cisalhamento promover a mescla com agitação deve durar pelo menos 45 minutos em temperaturas que oscilam de 190 até 218°C, para alcançar o nível desejável de interação entre a borracha e o ligante asfáltico. Para manter essas temperaturas, o ligante asfáltico é pré-aquecido até temperaturas em torno de 204 até 224°C, para compensar a adição do pó de borracha que se encontra a temperatura ambiente. Os óleos extensores podem ser adicionados ao ligante asfáltico durante a incorporação da borracha ou é possível utilizar asfaltos nos quais os óleos extensores foram previamente adicionados. Após mistura homogênea dos componentes e verificação da viscosidade desejável para atender às especificações, o asfalto borracha é bombeado

até tanques aquecidos onde as reações do asfalto borracha se desenvolvem durante 45 minutos, aproximadamente (LoPresti, 2013).

A Caltrans recomenda descontinuar o aquecimento do asfalto borracha se não é utilizado depois de 4 horas de concluída a reação dos 45 minutos. Se o material esfria, isto é, reduz sua temperatura abaixo dos 190°C, é necessário fazer um reaquecimento do asfalto borracha para manter ele na faixa dos 190 – 218°C.

Em alguns casos o asfalto borracha deve ser aplicado somente no dia seguinte da sua produção, o que produz uma contínua reação, digerindo-se a borracha no ligante asfáltico e reduzindo sua viscosidade. Nesses casos, a Caltrans recomenda adicionar mais borracha no ligante asfáltico no dia seguinte, para recuperar a elevada viscosidade do asfalto borracha. Nesses casos, deve se garantir novamente 45 minutos de digestão, previamente à sua utilização.

2.5.2.2 Asfalto Borracha na República da África do Sul

O asfalto borracha também é empregado na República da África do Sul há alguns anos e é definido como uma mistura “não homogênea” de ligante asfáltico e borracha moída, misturados em elevadas temperaturas. Naquele país recomenda-se reaproveitar a borracha dos pneus por meio de processos de trituração a temperatura ambiente e os processos criogênicos não são permitidos. As partículas de borracha devem ser pulverizadas, livres de fibras de nylon e de aço e de outros contaminantes.

De acordo com o Guia Técnico da Academia de Asfalto daquele país, quando utilizado em misturas asfálticas, influencia as propriedades mecânicas da mistura, modificando também os parâmetros volumétricos e sua trabalhabilidade. Usualmente, antes do início de um projeto que contempla o uso do asfalto borracha, amostras são encaminhadas a distintos laboratórios para avaliar o material e homologar as suas propriedades, (LoPresti, 2013).

A especificação sul africana *Committee of Land Transport Officials (COLTO)* indica que a borracha reaproveitada deve conter no mínimo 30% de borracha natural em massa, enquanto que o Guia Técnico da Academia de Asfalto especifica conteúdo de 60 a 75% de borracha natural, com todas as partículas de borracha passantes na peneira de 1,18mm. Na Tabela 2.14 são apresentadas essas informações de acordo com a Academia de Asfalto Sul-africana.

Tabela 2.14: Especificação para as partículas de borracha. FONTE: Asphalt Academy (2007)

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

A Associação Sul-africana de Betume (SABITA) recomenda o emprego de ligantes asfálticos de penetração de 60/70 e 80/100 (dmm), para produzir asfalto borracha do tipo B12 e B8, respectivamente. É permitido realizar uma mistura entre os ligantes asfálticos convencionais para produzir um material com uma viscosidade particular desejada.

A produção do asfalto borracha na África do Sul, de modo geral, é realizada pela mistura de 72-82% de ligante asfáltico, 0-4% de óleo extensor e 18-24% de borracha granulada, em um misturador patenteado de alto cisalhamento na velocidade de 3.000 revoluções por minuto, conforme ilustra a Figura 2.11. O ligante asfáltico é aquecido a temperaturas de 180°C até 220°C, por um período curto antes da adição da borracha. Durante a incorporação das partículas de borracha é recomendado manter as temperaturas na faixa de 190 até 200°C para garantir sua digestão no ligante asfáltico. Equipamentos especiais são necessários na produção deste asfalto borracha de elevada viscosidade, que tem vida útil de 4 a 6 horas para sua aplicação. Assim, essa produção é realizada no local de trabalho ou muito próximo dele, sendo que usualmente é aplicado em tratamentos superficiais.

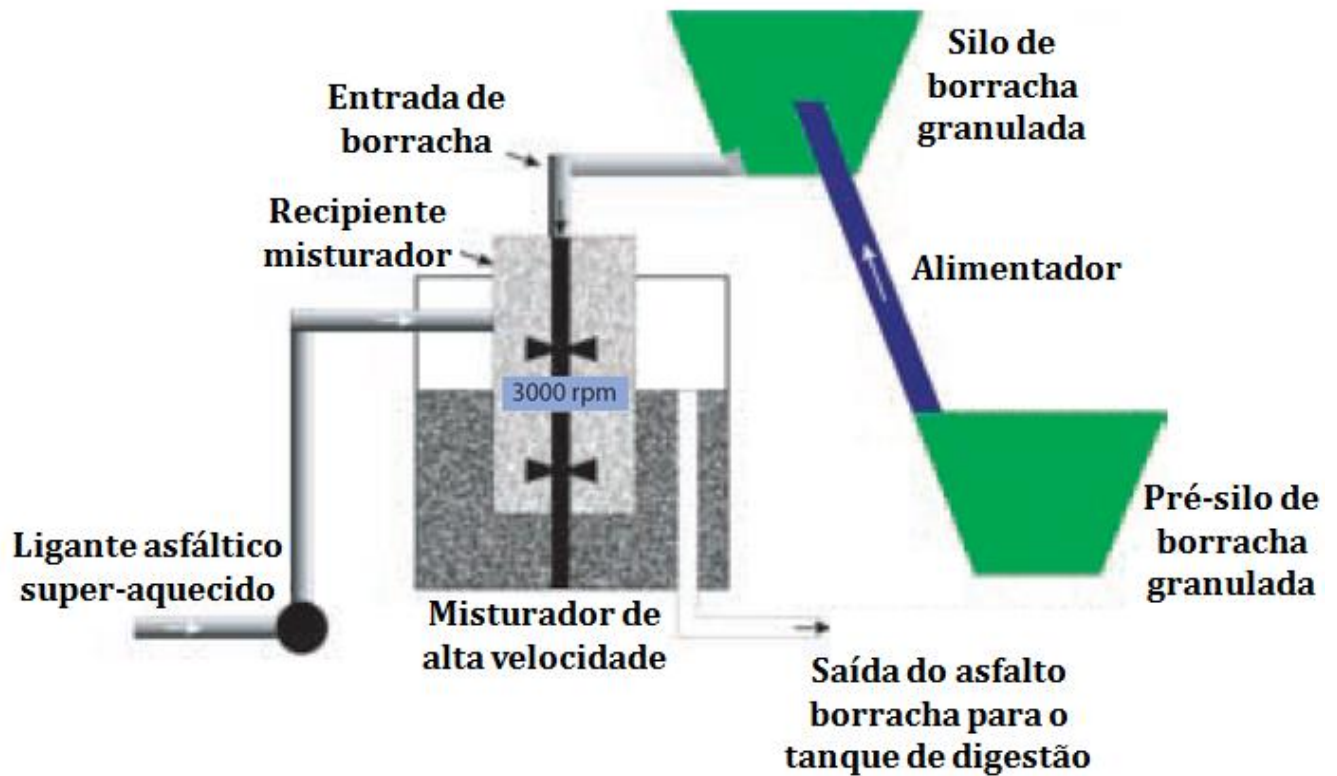


Figura 2.11: Esquema do equipamento para produção de asfalto borracha. FONTE: Asphalt Academy (2007)

As proporções dos ingredientes componentes do asfalto borracha são variáveis em função das condições climáticas e do tipo de aplicação alvejada. No entanto, os fabricantes de asfalto na África do Sul padronizam o teor de borracha em 20%, com uma pré-seleção de pneus. O óleo extensor empregado deve ter ponto de fulgor superior a 180°C e sua massa de hidrocarbonetos aromáticos não saturados deve ser superior a 55%. Carbonato de cálcio ou talco pode ser adicionado também ao asfalto borracha, com o objetivo de reduzir os riscos de aglutinamento das partículas de borracha.

Após a produção do asfalto borracha, a viscosidade do material deve ser aferida para verificar se o tempo de digestão foi suficiente para modificar o ligante asfáltico, dentro das especificações apresentadas na Tabela 2.15.

Tabela 2.15: Características do asfalto borracha para revestimentos selantes (S-R1) e para concretos asfálticos (A-R1). FONTE: Asphalt Academy (2007)

| 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 |
| Recuperação na compressão | 5 min | MB-11 | >70 | >80 |
| | 1 hora | | >25 | n/a |
| | 4 dias | | | |
| Resiliência @ 25°C | % | MB-10 | 13-35 | 13-40 |
| Fluência | Min | MB-12 | 15-70 | 10-50 |

Após a produção do asfalto borracha é recomendável utilizar ele na sua aplicação desejada em até 4 horas aproximadamente. Esse tempo é estabelecido em função da degradação do ligante asfáltico e da redução da viscosidade que acontece com o tempo e com a temperatura, conforme mostra a Figura 2.12. Assim, é necessário desenvolver uma boa sincronia entre o fabricante e o responsável pela execução de uma obra com asfalto borracha, para atender essa especificação. Caso todo o asfalto borracha não seja utilizado nesse prazo, é possível reaproveitar 25% em massa em novas composições de asfalto borracha.

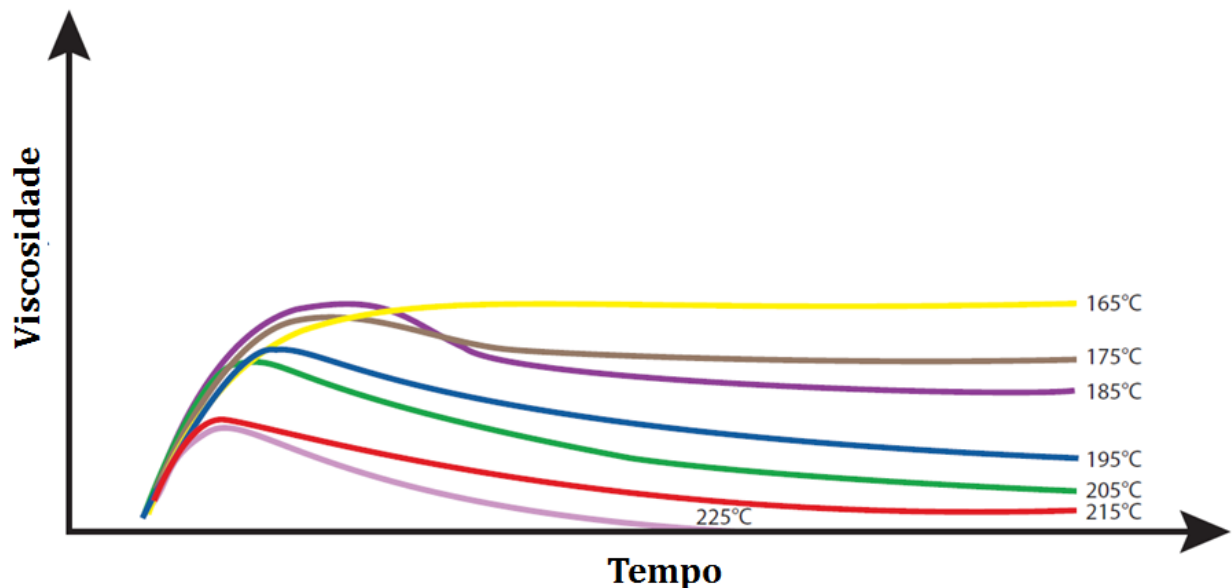


Figura 2.12: Variação da viscosidade do asfalto borracha com o tempo e temperatura. FONTE: Asphalt Academy (2007)

Na Tabela 2.16 é apresentado um resumo das temperaturas e tempos de estocagem, mistura e aplicação do asfalto borracha para suas distintas aplicações: S-R1, revestimentos asfálticos selantes; A-R1, concretos asfálticos e C-R1 para selagem de trincas.

Tabela 2.16: Temperatura e tempos de estocagem, mistura e aplicação do asfalto borracha. FONTE: Asphalt Academy (2007)

| 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 | |

2.5.2.3 Asfalto Borracha na Austrália e Nova Zelândia

As primeiras aplicações de borracha em pavimentos asfálticos na Austrália datam da década de 1950, quando 5% de borracha vulcanizada foi aplicada em um revestimento asfáltico com agregados de 10mm. No entanto, o desenvolvimento da técnica voltou a ser abordado na década de 1970 e desde 1986 vem sendo utilizado em camadas superficiais ou intermediárias para retardar o trincamento de pavimentos, (LoPresti, 2013). A Associação de Autoridades de Tráfego e Transporte de Rodovias da Austrália e Nova Zelândia (Austroads), inclui o asfalto borracha dentro do grupo de ligantes asfálticos modificados na Especificação AGPT/T190-2014.

A borracha recuperada de pneus inservíveis é classificada em dois tipos, em função do seu tamanho, a grossa chamada de 16 e a fina denominada de 30, cada uma com as suas características, como mostra a Tabela 2.17. O ligante asfáltico base recomendado deve apresentar uma penetração de 85-100 dmm.

Tabela 2.17: Especificação Austroads AGPT/T190 para as partículas de borracha empregadas na modificação de ligantes asfálticos

| 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 |

A Austroads recomenda realizar um procedimento experimental para determinar as proporções adequadas dos materiais constituintes do asfalto borracha:

- Uma primeira tentativa de mistura é realizada para cada uma das concentrações de borracha, aplicando uma temperatura de mistura de 195°C, um período de digestão de 45min para a borracha tamanho 16 e 30min para a borracha tamanho 30.
- As características das misturas são determinadas e os resultados lançados em um gráfico versus a concentração de borracha. A concentração que atende as características especificadas é considerada a de projeto.
- Após designada a concentração de projeto é realizada uma extração da borracha para verificar a concentração, de acordo com o método de laboratório da Austroads AG:PT/T1 42. Esse valor é empregado para o controle de amostras de campo durante a execução das obras com asfalto borracha.

Na Austrália existem basicamente três tipos de asfalto borracha, designados como S15RF, S18RF e S55R. Os dois primeiros são empregados em concretos asfálticos, enquanto que o terceiro é utilizado em camadas selantes. Esses materiais podem ser produzidos em fábricas de asfalto ou diretamente no local da aplicação.

Na produção do asfalto borracha em fábricas, usualmente se incluem óleos e os conteúdos de borracha são inferiores, quando comparadas com as concentrações de asfalto borracha produzidos em campo. O pó de borracha moído mais fino é utilizado neste caso, para conseguir um bom nível de digestão em tempos curtos. O asfalto borracha de fábrica, produzido pela via úmida, é empregado em misturas asfálticas para melhorar seu comportamento mecânico. Segundo LoPresti (2013), estão sendo realizados estudos para empregar a borracha em teores superiores a 8% como uma alternativa de modificador para ligantes asfálticos, com o intuito de poder realizar estocagem e/ou transportar em longas distâncias.

O asfalto borracha produzido em campo contém aproximadamente 25% de borracha em massa e não é adicionado óleo. Esta formulação não é apropriada para o transporte do asfalto borracha em longas distâncias ou para estocar por longos períodos, mas representa o melhor tipo de asfalto borracha, quando a digestão é apropriadamente realizada. O asfalto borracha produzido em campo é usualmente aplicado em revestimentos selantes.

2.5.2.4. Asfalto Borracha no Brasil

Aproximadamente há uma década, as agências rodoviárias nacionais especificaram o material de asfalto borracha e sua utilização pela via úmida. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por meio da Norma DNIT 111/2009-EM, define o “cimento asfáltico de petróleo modificado pela adição por processo via úmida, de borracha moída de pneus inservíveis (partículas passantes na peneira nº 40), resultando em uma mistura na qual a borracha moída representa geralmente de 15 a 20% da massa do ligante. Nessa normativa são especificadas as características de dois tipos de asfalto borracha, AB-8 e AB-22, conforme apresentado na Tabela 2.18.

Tabela 2.18: Especificação de asfalto borracha pelo DNIT 111/2009-EM

| 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 |

A Norma DNIT 111/2009-EM, ainda, define o processo de via úmida do tipo “*Terminal Blending*” como o processo pelo qual se obtém o asfalto borracha estocável, no qual os componentes são misturados em um terminal especial, a altas temperaturas, por agitação com alto cisalhamento, resultando em um ligante estável e homogêneo. No entanto, não especifica o tempo máximo entre a produção do asfalto borracha e sua aplicação em campo e atribui as condições de armazenamento e estocagem para que sejam definidas pelo fabricante.

Na Norma DNIT 112/2009-ES se especifica a sistemática a ser empregada para executar camadas de pavimentos flexíveis com misturas asfálticas a quente utilizando ligante asfáltico do tipo asfalto-borracha, obtido mediante o processo da via úmida. Recomenda-se o emprego dos dois tipos de asfalto borracha para faixas granulométricas específicas:

- **AB-8:** para as faixas “A”, “B” e “C” do DNIT e para a faixa descontínua tipo “*Gap Graded*”;
- **AB-22:** para a faixa descontínua tipo “*Gap Graded*”.

Os Estados do Paraná, Santa Catarina, São Paulo e Rio de Janeiro também tem as normativas próprias para a execução de misturas asfálticas com asfalto borracha:

- **Paraná:** DER/PR ES-P28-05;
- **Santa Catarina:** DEINFRA-SC-ES-P-05B/05;
- **São Paulo:** ET-DE-P00/030.
- **Rio de Janeiro:** DER/RJ IT 65, IT 66, IT 67, IT 68 e IT 69.

Na Tabela 2.19 é apresentado um resumo comparativo das normativas dos Estados do Paraná, Santa Catarina e São Paulo com o DNIT. Nesses casos estabelece-se o emprego do asfalto borracha do tipo “Terminal Blend”.

Tabela 2.19: Comparativo das normativas de DER estaduais com a normativa do DNIT

| 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 |
| Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C | | | | | | |
| 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 |

Devido à elevada viscosidade do asfalto borracha e à possibilidade de apresentar falta de estabilidade à estocagem, é recomendável utilizar nas usinas de asfalto que fazem uso deste produto, tanques verticais com sistemas de agitação, conforme é ilustrado nas Figuras 2.13 e 2.14. O equipamento apresentado nessas figuras é usualmente recomendado nos Estados Unidos, Europa, República da África do Sul e Austrália para trabalhar com ligantes asfálticos modificados por polímeros e por borracha. O objetivo de empregar esse tipo de tanques de armazenamento para os asfaltos modificados é minimizar os riscos de separação de fases, seja do polímero ou da borracha, do ligante asfáltico base.



Figura 2.13: Tanques verticais com sistemas de agitação em três níveis. FONTE:

<http://heatec.com/literature/brochures/HeatecAsphaltTanks.pdf>

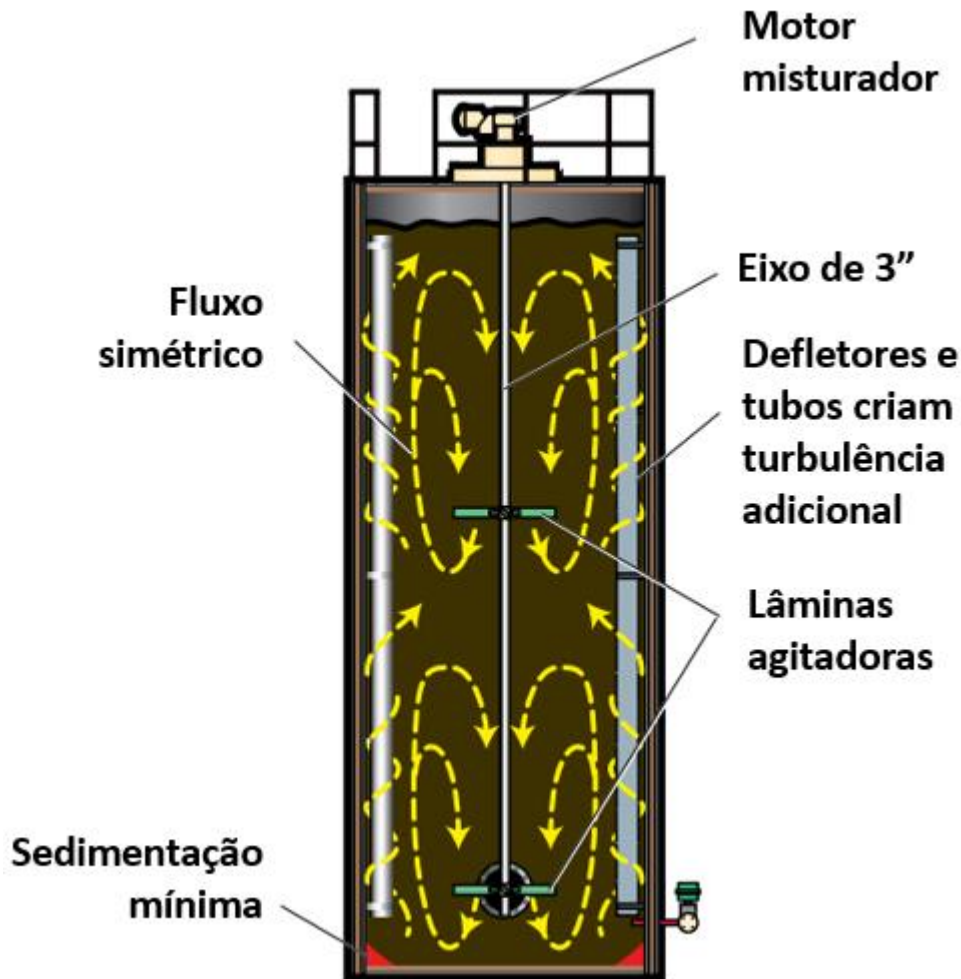


Figura 2.14: Funcionamento do tanque vertical com agitadores. FONTE:

<http://heatec.com/literature/brochures/HeatecAsphaltTanks.pdf>

Com relação ao Estado do Rio de Janeiro, recomenda-se a aplicação do asfalto borracha utilizando a metodologia Tipo "Field Blend" ou "in situ", com a adição de no mínimo 18% de borracha granulada, para obter um material de alta viscosidade. A Instrução Técnica IT66 do DER-RJ estabelece que ligantes asfálticos de alta viscosidade são aqueles que apresentam viscosidade de 2.500 cP até 6.500 cP, na temperatura de 175°C.

2.6.CARACTERÍSTICAS DO ASFALTO BORRACHA (AB)

A incorporação da borracha no ligante asfáltico produz uma série de mudanças nas suas características. Os ensaios convencionais, tais como penetração e ponto de amolecimento têm sido empregados para caracterizar o AB, mas para avaliação do desempenho, também é possível lançar mão da análise reológica. A seguir são apresentadas as interações que produzem essas mudanças

nas características do asfalto borracha, e na continuação são discutidas algumas características do AB, de acordo com estudos realizados no país e no exterior.

2.6.1. Mecanismos de interação do asfalto borracha

O estudo das interações de asfalto borracha é objetivo de estudo de diversas pesquisas ao redor do mundo. O motivo principal é atribuído à importância do controle de qualidade das características do AB durante sua produção, transporte e possível armazenamento.

É importante iniciar descrevendo o material que é modificado, que é o ligante asfáltico ou o cimento asfáltico de petróleo (CAP). O CAP é um material preto e de consistência semissólida, obtido da destilação do petróleo. Basicamente é uma composição de 8-11% de Hidrogênio, 82-86% de carbono, 0-2% de oxigênio, e 0-6% de enxofre, com conteúdo baixo de nitrogênio, vanádio, níquel e ferro. Além disso é uma mistura complexa de moléculas parafínicas, naftênicos e aromáticos. Existem aproximadamente 1.500 fontes de petróleo ao redor do mundo, e somente alguns, em função da qualidade do produto resultante, são considerados apropriados para a produção de ligantes asfálticos (Read e Whiteoak, 2003).

Os componentes químicos do ligante asfáltico podem ser identificados como asfaltenos e os maltenos. Os maltenos podem ser ainda subdivididos em três grupos de saturados, aromáticos e resinas. Assim, obtêm-se a estrutura representativa chamada de SARA (saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos). A natureza polar das resinas fornece ao asfalto suas propriedades adesivas e dúcteis, além de funcionar como agentes dispersantes dos asfaltenos.

As características visco-elásticas dos asfaltos são influenciadas pelas proporções entre os asfaltenos e os maltenos (Leite, 1999; Navarro et al. 2002;). A complexidade, o conteúdo de heteroátomos, aromáticos e incremento de peso molecular estão na ordem de $S < A < R < A$ (saturados < aromáticos < resinas < asfaltenos) (45). Estudos de Loeber et al. (1998) indicam que há uma forte dependência do comportamento reológico dos asfaltos com relação às proporções dos componentes, por exemplo, asfaltos com elevada relação asfaleno/resina apresentam uma rede estrutural mais rígida e elástica (baixo ângulo de fase e elevado módulo cisalhante complexo), enquanto que asfaltos com elevadas relações de resina/asfaltenos levam a um comportamento mais viscoso, com elevado ponto de amolecimento e baixa penetração.

As resinas têm peso molecular intermediário e são uma fração semissólida formada por anéis aromáticos com cadeias laterais. As resinas são moléculas polares que evitam a coagulação das moléculas de asfaltenos. Os materiais com peso molecular mais baixo são os óleos não polares, que

tem elevada proporção de cadeias, quando comparadas com o número de anéis. Usualmente, as resinas e os óleos são chamados de forma conjunta como maltenos. De forma geral, os asfaltenos constituem a maior parte do asfalto, enquanto que as resinas contribuem à adesividade e ductilidade e os óleos influenciam as propriedades viscosas (Mashaan et al, 2013). De acordo com a microestrutura e o sistema coloidal, os asfaltenos são difusos em uma matriz oleosa de maltenos, cobertos pelas resinas com espessura variável em função da temperatura na qual é realizada a análise (Navarro et al, 2009).

A polaridade do asfalto é outra propriedade importante e se refere à orientação independente que as moléculas se posicionam no sistema asfalto. De acordo com o Robertson (1991), os heteroátomos, nitrogênio, enxofre, oxigênio e metais são dependentes da polaridade, que é alterada também com a oxidação e o envelhecimento do ligante asfáltico, incrementando sua polaridade.

A efetividade das modificações no ligante asfáltico pela incorporação do asfalto borracha depende da dispersão das partículas de borracha, no nível de dissolução molecular e da interação entre o asfalto e a borracha. Durante o processamento do asfalto borracha, ou a chamada “digestão” ou “cura”, ocorrem alterações das propriedades do ligante asfáltico, devido a mudanças físico-químicas. O tempo e a temperatura de “digestão” ou “cura” são fatores que afetam profundamente no grau de dispersão da borracha, seja ela vulcanizada ou não.

De acordo com Jensen e Abdelrahman (2006), existem três estágios nos quais ocorre a interação do asfalto borracha:

- I. estágio inicial ocorre imediatamente depois que a borracha é introduzida ao ligante asfáltico;
- II. estágio intermediário de armazenamento, no qual o asfalto é mantido a elevadas temperaturas durante algumas horas antes de ser misturada com os agregados;
- III. estágio prolongado de estocagem, quando a mistura Asfalto-Borracha é armazenada durante longos períodos antes de ser misturada com os agregados.

Segundo Abdelrahman e Carpenter (1999), os dois principais mecanismos de interação, que acontecem nesses estágios e que afetam as propriedades do asfalto borracha durante sua produção são o inchamento das partículas e a degradação que ocorre por meio da desvulcanização e da despolimerização. A forma e o grau em que esses processos se desenvolvem é altamente dependente das combinações de tempo e temperatura na produção do asfalto borracha.

A expansão das partículas de borracha corresponde ao aumento do volume, devido à absorção de componentes leves do ligante asfáltico. A mistura entre o asfalto e a borracha moída de pneu não consiste de reação química, mas de absorção dos óleos aromáticos de cimento asfáltico nas cadeias do polímero borracha (HEITZMAN 1992). As partículas de borracha são inchadas a altas temperaturas e formam gel com aumento de viscosidade do asfalto da ordem de 10.

Após introdução das partículas de borracha no ligante asfáltico, estas absorvem as frações mais leves do CAP e provocam o enrijecimento do ligante asfáltico residual (Shen et al. 2009). A absorção produz uma expansão dos grãos de borracha, reduzindo o espaço entre estas partículas. Nos asfaltos em que são utilizados grãos menores de borracha, o grau de modificação é maior, mas também isto é dependente das características do CAP original.

Miknis e Michon (1998) investigaram a interação entre o asfalto e a borracha por meio de ressonância magnética nuclear por imagem, para visualizar a expansão das partículas e a dissolução dos componentes da borracha no asfalto, além da desvolatilização e as interligações cruzadas. Os resultados do estudo indicam que as partículas de borracha se expandem, e esse grau de expansão é dependente das moléculas asfálticas.

Alguns estudos também têm analisado a possibilidade de incluir óleos extensores na composição do asfalto borracha para facilitar a incorporação da borracha no ligante asfáltico. A borracha reage com os óleos aromáticos do óleo extensor e, portanto, cumpre a função de recompor a composição química do ligante asfáltico original. Além disso, as viscosidades resultantes do AB não são tão elevadas, de modo que o material pode ser utilizado em temperaturas mais apropriadas para uso na pavimentação (Faxina, 2002). Não obstante, Faxina (2006) também avaliou posteriormente o emprego do resíduo de óleo de xisto em AB, com o intuito de melhorar a trabalhabilidade das misturas asfálticas. O pesquisador observou que esse óleo pode significar redução nas características de resistência à deformação permanente em misturas asfálticas. Por outro lado, seu uso, pode ter efeito positivo sobre a resistência à formação de trincas por fadiga.

A Caltrans (2011) também recomenda o emprego de modificadores aromáticos hidrocarbonados para o asfalto borracha, em porcentagens variáveis de 2 a 6%. Nesses casos, recomendam o uso de AB de alta viscosidade, superior a 1500cP.

A despolimerização e desvulcanização reduzem as moléculas de asfalto borracha em moléculas de menor peso molecular. Zanzotto e Kennepohl (1996), afirmam que esses fenômenos são devidos à reações químicas entre a borracha e o asfalto, as quais implicam transferências de massa. Estudos

de Navarro et al. (2004), mostraram que 85% da borracha adicionada ao ligante asfáltico permanecem insolúveis após o processamento. Assim, o comportamento reológico é dependente dos componentes solúveis e insolúveis da borracha moída. Diferente dos asfaltos modificados por polímero, nos quais os polímeros se fundem para obter um material homogêneo, no asfalto borracha obtêm-se, portanto, um material heterogêneo.

Com relação aos fatores que influenciam nas interações do asfalto borracha pode ser realizada a divisão em dois grupos. No primeiro refere-se às propriedades dos materiais utilizados e o segundo é relacionado ao processo utilizado na modificação do asfalto borracha.

Com relação ao material, alguns estudos indicam que o asfalto base afeta significativamente as propriedades convencionais do asfalto borracha. A porcentagem de frações leves é considerada um fator que afeta a interação asfalto-borracha. Boulding et al. (1990) indicam que ligantes asfálticos de menor consistência seriam mais compatíveis com borrachas. Para Leite (1999), a borracha pode ser compatível com asfaltos oriundos de distintos tipos de petróleos, desde que se estabeleçam, de forma prévia, as condições ideais de preparo, que possibilitem a degradação/desvulcanização das partículas e sua incorporação nas moléculas do asfalto.

A borracha utilizada no processo também influencia diretamente nas interações deste material. Dentre os fatores que devem ser destacados estão o tipo de procedimento de produção da borracha moída de pneus, sua densidade, sua textura superficial, sua granulometria e o conteúdo utilizado, (LoPresti, 2013).

Com relação ao grupo de fatores associado ao processo utilizado na modificação do asfalto borracha, vale citar que os principais influentes são a temperatura e o tempo de mistura. Aderlrahman e Carpenter (1999) indicam que em temperaturas baixas, em torno de 160°C, a interação é dada basicamente pelo inchamento das partículas, enquanto que em temperaturas muito altas (aproximadamente 240°C), a interação é atribuída à despolimerização e desvulcanização.

O tempo de processamento ou “digestão” também influencia as interações do asfalto borracha e é dependente das características de cada material. Adelrahman e Carpenter (1999) concluem que o efeito do tempo de interação está intimamente ligado com a temperatura de produção do asfalto borracha. Esses autores identificaram dois estágios: um inicial, ou de curta duração (30 a 40 minutos) e outro de longo prazo (algumas horas). No estágio inicial são desenvolvidas a maior

parte das modificações, sendo que no estágio de longo prazo acontecem as interações de estabilização.

Alguns autores também indicam que maiores velocidades de agitação, durante a produção do asfalto borracha, facilitam o desenvolvimento das interações (Billiter et al, 1997; Specht, 2004; Faxina, 2006). A maior velocidade de agitação provoca maior inchamento das partículas e pode significar a redução do tempo de digestão.

2.6.2. Penetração

O ensaio de penetração talvez seja o parâmetro mais antigo utilizado para caracterizar os ligantes asfálticos. Consiste basicamente em medir a penetração que uma agulha padronizada, com a carga de 100 gramas produz durante 5 segundos em uma amostra de ligante asfáltica na temperatura de 25°C. O resultado é apresentado em décimos de mm. De acordo com o programa SHRP é um ensaio inadequado para avaliar as propriedades fundamentais ou para a caracterização do comportamento reológico de ligantes asfálticos.

Existem poucos estudos que tenham avaliado o asfalto borracha por meio deste ensaio. Specht (2004) realizou uma análise laboratorial do asfalto borracha a partir de um planejamento fatorial, no qual considerou o percentual de borracha, sua granulometria, a temperatura e o tempo de mistura. O autor afirma que a incorporação de borracha no ligante asfáltico reduz a penetração.

2.6.3. Ponto de amolecimento

É um parâmetro empírico obtido no ensaio de anel e bola, correspondente ao valor da temperatura na qual a consistência de um asfalto passa do estado sólido ou semissólido para o estado líquido. Muitos estudos utilizaram este parâmetro para avaliar o efeito de adicionar borracha aos ligantes asfálticos. Oda e Fernandes Jr. (2001) indicam que a adição de borracha faz com que o ponto de amolecimento do ligante asfáltico aumente, o que poderia indicar um incremento na resistência ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda. Specht (2004) observou a mesma tendência no seu estudo de avaliar a incorporação de borracha moída de pneus a ligantes asfálticos. Segundo a FHWA (2017), o AB apresenta maiores valores de PA, em torno de 11°C a 14°C a mais, quando comparados com ligantes asfálticos convencionais.

2.6.4. Viscosidade

A viscosidade é uma propriedade muito importante dos ligantes asfálticos, utilizada para determinar as temperaturas de bombeamento do ligante asfáltico, usinagem e compactação das

misturas asfálticas. Basicamente, essa propriedade representa a resistência dos líquidos ao deslocamento de suas camadas umas contra as outras, isto é, o atrito interno do fluido. O viscosímetro rotacional (Brookfield), tem sido utilizado para medir a viscosidade dos ligantes asfálticos. O SHRP estabeleceu o valor máximo de 3.000cP para assegurar o bombeamento do ligante asfáltico e a trabalhabilidade das misturas asfálticas (Faxina, 2006).

A adição de borracha moída de pneus nos ligantes asfálticos incrementa consideravelmente a viscosidade. De acordo com Leite (1999) os ligantes asfálticos modificados por borracha apresentam viscosidade muito superior às usualmente encontradas nos asfaltos modificados por polímero. Segundo Faxina (2006), óleos extensores poderiam ser empregados para reduzir as elevadas viscosidades deste tipo de ligantes.

A alta viscosidade do asfalto borracha está associada à não dissolução completa das partículas de borracha no ligante asfáltico e, se ocorresse a dissolução completa, seria possível obter um ligante asfáltico mais homogêneo com viscosidades mais baixas (Billiter et al, 1997). Zaman et al. (1995) também reconhecem a elevada viscosidade dos ligantes asfálticos com borracha, mas afirmam que não há riscos de formação de gel pela adição de borracha.

De acordo com a Caltrans (2003), a elevada viscosidade do ligante asfáltico modificado por borracha, incrementa a espessura da película que recobre os agregados das misturas asfálticas, sem ocasionar escorrimento do CAP nem exsudação no pavimento.

2.6.5. Parâmetros reológicos

Os parâmetros reológicos obtidos por meio dos ensaios propostos pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP), dos Estados Unidos, também são utilizados para avaliar os efeitos da incorporação do asfalto borracha no comportamento reológico dos ligantes asfálticos. As mudanças do comportamento reológico são atribuídas à borracha incorporada, cuja característica principal é sua elevada elasticidade, devido à sua estrutura molecular, que lhe permite deformar com recuperações quase instantâneas após retirada do carregamento.

A borracha pertence aos materiais conhecidos como polímeros e também é referido como um elastômero. Segundo LoPresti (2013), as propriedades das borrachas elastoméricas podem ser resumidas da seguinte forma:

- a) as moléculas são muito longas e livres para girar ao redor das ligações vizinhas de unidades moleculares;

- b) as moléculas são ligadas, de forma química ou mecânica, em diversos pontos para formar uma rede tridimensional. Portanto, a ligação é cruzada ou reticuladas.
- c) além das partículas serem reticuladas, as moléculas têm liberdade para se movimentar entre elas, isto é, as forças de Van der Waal são pequenas.

Diferentemente do ligante asfáltico puro, a borracha resiste bem a temperaturas ambientes e até superiores, mantendo suas propriedades elásticas. Esse comportamento é atribuído à estruturação reticulada das moléculas da borracha (LoPresti, 2013).

2.6.5.1. Módulo complexo e ângulo de fase

Oda e Fernandes Jr. (2001) desenvolveram um programa laboratorial para avaliar ligantes asfálticos com distintos teores de borracha moída de pneus, por meio dos ensaios da especificação SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavments*). Os autores observaram que a adição de borracha produz um incremento no valor de G^* , fenômeno que pode ser associado a maior resistência à evolução de deformação permanente. Também constataram a redução do ângulo de fase, com o incremento do teor de borracha moída no CAP, o que indica maior elasticidade, e, portanto, maior resistência à formação de trincas por fadiga no pavimento

Nas amostras laboratoriais produzidas por Specht (2004), notou-se a mesma tendência, a adição de borracha reduz o ângulo de fase, de modo a incrementar a parcela elástica e aumenta o valor de G^* , melhorando as características de resistência à deformação permanente do ligante. Essas taxas de incremento tendem a ser maiores para os teores de borracha mais elevados.

Navarro et al. (2002), estudaram também as características reológicas de ligantes asfálticos modificados por borrachas e concluíram que a adição de borracha melhorou as características viscoelásticas dos ligantes asfálticos originais. Dos resultados, os autores avaliam que misturas asfálticas com esses ligantes poderiam resistir bem à deformação permanente, fadiga e trincamento térmico. Além disso, compararam o comportamento com ligantes asfálticos modificados por 3% de polímero SBS, e encontraram comportamento reológico corresponde ao asfalto borracha com 7 a 9% de borracha.

O estudo de Mashaan e Karim (2013) em ligantes asfálticos modificados por borracha mostrou que os parâmetros G^* , G' e G'' se incrementam quando a borracha é adicionada, enquanto que o ângulo de fase é reduzido. Esses autores relatam que o incremento da borracha é relacionado ao incremento da relação asfaltenos/resinas o que provavelmente melhoraria as características de rigidez, tornando o CAP modificado menos sensível às mudanças de temperatura.

2.6.5.3. Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla

Domingos e Faxina (2015) empregaram o ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR) para avaliar a recuperação elástica e a compilância não recuperável em um ligante asfáltico do tipo CAP 50-70 e em um AB com 14% de borracha produzida em laboratório. Os resultados indicaram, na temperatura de avaliação de 76°C e tensão de 3.200Pa, uma recuperação elástica de 6% no AB, e de 0% no CAP 50-70, como era de se esperar, o ligante asfáltico convencional não apresenta recuperação elástica. Já a compilância não recuperável (Jnr), nas mesmas condições de ensaio, foi em torno de 2,21kPa⁻¹, frente a um Jnr de 13,11kPa⁻¹, obtido no CAP 50-70. Valores baixos de Jnr (até 4,0kPa⁻¹) indicam menor possibilidade de desenvolver deformação permanente na mistura asfáltica em serviço.

Balaguer (2012) também empregou o ensaio de MSCR para avaliar o ligante asfáltico modificado por borracha utilizado na RJ-122, no Estado de Rio de Janeiro. O autor utilizou o resultado de Jnr, que foi aproximadamente 0,4kPa⁻¹, para estimar a deformação permanente na trilha de rodas do pavimento. Para isso empregou a curva da FHWA-HIF-11-038, April 2011, e verificou que a mistura asfáltica produzida com esse ligante apresentaria no final da sua vida útil um ATR de 0,5 mm.

Camargo (2016) avaliou o potencial de resistência à deformação permanente de um CAP 30/45, um ligante asfáltico modificado por polímero e um asfalto borracha produzido com a técnica *just in time*, por meio do ensaio de MSCR. O autor observou que o asfalto borracha apresentou maiores valores de recuperação elástica, nas temperaturas empregadas do ensaio, de 58 a 70°C, e sua variação foi a menos expressiva, quando comparada com outros ligantes asfálticos, indicando sua menor susceptibilidade à variação térmica. Ainda no ensaio de MSCR, o autor observou valores de compilância não recuperável (Jnr) muito baixos para o asfalto borracha, até 55% inferiores ao asfalto convencional, evidenciando sua superioridade para resistir à deformação permanente.

Thodesen et al. (2009) avaliaram um asfalto borracha produzido com 10% de borracha e 1% de SBS, no ensaio de MSCR. Os resultados obtidos indicam valores de compilância não recuperável muito inferior à obtida em ligantes asfálticos convencionais.

2.6.5.3. Ensaios reológicos de fadiga

Os ensaios reológicos para prever a fadiga ainda não foram definidos por normativas ASTM ou AASHTO, até elaboração deste relatório, mas existem alguns procedimentos que podem ser realizados no reômetro para tentar avaliar o potencial dos ligantes asfálticos para desenvolver trincamento por fadiga em misturas asfálticas. Tal é o caso do ensaio de LAS (*Linear Amplitude*

Sweep) recomendado pela Universidade de Wisconsin. Camargo (2016) empregou esse ensaio de LAS e também o ensaio de TST (*Time Sweep Tests*) para avaliar as características de fadiga em um CAP 30/45, um asfalto modificado por polímero do tipo SBS e um asfalto modificado por borracha moída de pneus, produzido com a técnica *just in time*. Em ambos ensaios, o autor constatou que a vida de fadiga, foi muito maior no asfalto borracha, quando comparada com os outros ligantes asfálticos estudados.

2.6.7. Perda de Massa

A estufa RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), é utilizada para simular em laboratório o envelhecimento de curto prazo do ligante asfáltico, isto é, aquele que acontece durante seu aquecimento em usina, na produção da mistura asfáltica e na compactação. No ensaio é utilizada uma quantidade de ligante asfáltico conhecida, e após finalização do envelhecimento, determina-se a massa novamente, sendo que a diferença é denominada “Perda de Massa”. Esse parâmetro é importante para controlar o uso de materiais voláteis que possam prejudicar a qualidade do ligante asfáltico.

Nos testes realizados por Lee et al (2006), em misturas de asfalto borracha em distintas proporções, envelhecidas no RTFOT, observou-se o mesmo nível perda de massa, independentemente das combinações realizadas para a produção deste ligante asfáltico.

Testes no TFOT (*Thin Film Oven Test*) realizados por Liang e Lee (1996) com dezoito ligantes asfálticos modificados por borracha mostraram que estes ligantes apresentam menor perda de massa em relação aos ligantes asfálticos convencionais.

2.6.6. Durabilidade e Envelhecimento

O projeto de misturas asfálticas se desenvolve para obter uma dosagem balanceada que atenda uma série de parâmetros e propriedades, dentro das quais a durabilidade é considerada uma das mais importantes. A durabilidade pode ser associada ao grau de resistência dos pavimentos às mudanças das propriedades físico químicas dos materiais mais superficiais, devido à ação do tráfego e das condições climáticas. A vida útil do revestimento do pavimento depende principalmente do desempenho do ligante asfáltico, da dosagem e das técnicas construtivas.

O envelhecimento do concreto asfáltico pode provocar o trincamento e a desintegração do revestimento. A taxa de enrijecimento do ligante asfáltico é um bom indicador para avaliar sua

durabilidade relativa. Muitos fatores podem contribuir no enrijecimento do ligante asfáltico, como por exemplo a oxidação, volatilização, polimerização e tixotropia. Isto se deve a que o asfalto é um composto orgânico, capaz de reagir com o oxigênio do meio ambiente. Os compósitos do asfalto se modificam com as reações da oxidação produzindo um material de estrutura mais quebradiça. Essa reação é referenciada como enrijecimento devido ao envelhecimento ou à oxidação (PETERSON, 1984).

A volatilização se desenvolve nos componentes mais leves do asfalto que tendem a evaporar e é usualmente relacionado às elevadas temperaturas às quais o ligante asfáltico é submetido durante a produção do concreto asfáltico.

A polimerização é o meio pelo qual as resinas se combinam com os asfaltenos e, portanto, o CAP se torna mais frágil e tende a apresentar comportamento não-Newtoniano. No final da reação, a tixotropia, ou o incremento da viscosidade com o tempo, também contribui para o fenômeno de envelhecimento do CAP. No entanto, os fatores mais importantes que contribuem no processo de envelhecimento parecem ser a oxidação e a volatilização (Mashaan et al, 2014).

A ocorrência do enrijecimento estérico e a associação molecular reversível tempo-temperatura afeta também as propriedades dos ligantes asfálticos, mas não são considerados como efeitos de envelhecimento. O enrijecimento estérico simplesmente é um fator em temperaturas intermediárias, já em temperaturas elevadas o excesso de energia cinética no sistema evita esta associação e a baixas temperaturas a taxa de associação é considerada mínima devido à elevada viscosidade.

Oda e Fernandes Jr. (2001), afirmam que o ligante asfáltico modificado por borracha apresenta menor taxa de envelhecimento devido à presença de antioxidantes e carbono na borracha dos pneus que é incorporada ao asfalto. Segundo Specht e Ceratti (2003), as borrachas vulcanizadas transferem ao ligante asfáltico algumas características químicas, como inibidores de raios ultravioleta e antioxidantes, que melhoram muito a resistência ao envelhecimento. Esta pode ser considerada uma das grandes vantagens em relação aos ligantes asfálticos tradicionais.

Segundo Epps (1994), Natu e Tayebali (1999) e Ali et al (2013) o negro de fumo da borracha, inibe o envelhecimento do ligante, aumentando sua durabilidade.

Balaguer (2012) indica que com a incorporação da borracha moída de pneus ao ligante asfáltico, obtém-se um produto que resiste melhor à fatores ligados tanto ao envelhecimento do ligante, como exposição aos raios UV solares e a oxidação pelo contato com o oxigênio do ar, quanto pela

ação do tráfego. Essas são consequências que causam o enrijecimento do asfalto, deixando-o menos dúctil e, conseqüentemente, mais quebradiço. Ao se incorporar a borracha moída ao ligante, na temperatura e tempo adequados e com agitação, a borracha e o ligante asfáltico reagem entre si. Essa reação acontece através da absorção, tanto pela borracha natural quanto pela borracha sintética, dos óleos aromáticos do ligante asfáltico. Tal reação promove a formação de um gel viscoso e o aumento da viscosidade da mistura, prolongando a presença dos maltenos no betume e, conseqüentemente, atribuindo uma maior resistência ao envelhecimento das misturas asfálticas.

Specht (2004) utilizou a estufa RTFOT para determinar a perda de massa dos ligantes asfálticos com borracha avaliados no seu estudo. Em todas as amostras avaliadas notou-se perdas de massa baixas, inferiores à recomendada de 1%, mas houve uma pequena tendência de se aumentar a perda com o incremento de borracha adicionado.

O estudo de Morilha Júnior (2004) em ligantes asfálticos modificados por borracha moída de pneus mostra que estes materiais apresentam aumento de elasticidade após o ensaio de RTFOT. Isto evidencia um ganho elástico após a usinagem mesmo com o aumento de consistência observado. Este é um forte indício de que estes ligantes são mais resistentes ao envelhecimento.

Nos testes realizados por Lee et al (2006), em misturas de asfalto borracha em distintas proporções, envelhecidas no RTFOT e no PAV, observou-se o mesmo nível de envelhecimento, independentemente das combinações realizadas para a produção do AB.

Mahrez e Rehan (2003) investigaram os efeitos de envelhecimento nas propriedades viscoelásticas do asfalto modificado por borracha utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), sendo que o envelhecimento foi realizado nas estufas TFOT, RTFOT e PAV. Como era esperado, as amostras envelhecidas apresentaram valores maiores de rigidez e elasticidade, devido ao incremento do módulo de armazenamento G' .

2.6.7. Estocabilidade

O mecanismo de separação de fase pode acontecer nos ligantes asfálticos modificados por borracha durante o transporte e/ou estocagem. Esse fenômeno é relacionado às diferenças entre as propriedades físicas dos materiais constituintes da mistura de AB. Assim, no período inicial, e se o AB é armazenado a elevadas temperaturas, as partículas de borracha tendem a decantar devido às maiores densidades que apresentam (Navarro, 2004).

As melhorias usualmente adotadas para corrigir e até eliminar estes fenômenos de separação de fase estão associadas à seleção adequada dos materiais que serão utilizados na mistura de AB, de

forma que se garanta um elevado nível de solubilização da borracha na matriz asfáltica. Em alguns casos, o emprego de polímeros, tais como SBS, podem melhorar a compatibilização do asfalto com a borracha, e também enxofre para melhorar a ligação cruzada.

Também podem ser empregadas temperaturas de estocagem mais baixas para reduzir a instabilidade de certos AB, assim como reduzir o tempo de estocagem (LoPresti, 2013).

Nos Estados Unidos, aqueles Estados com maior experiência na produção de misturas asfálticas com asfalto borracha, têm optado por utilizar este produto na forma não-estocável. Nota-se naquele país a tendência em produzir misturas asfálticas com AB pela metodologia de *just in time*, com no máximo algumas horas de estocagem após produção do AB. No caso em que há estocagem, em períodos curtos, os tanques são obrigatoriamente dotados de agitadores, (Specht, 2004).

2.7. CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO ASFÁLTICO PRODUZIDO COM ASFALTO BORRACHA

O ligante asfáltico modificado por borracha moída de pneus, ou simplesmente asfalto borracha (AB), teve suas primeiras aplicações em pequenas operações de remendos como foi citado anteriormente. O desenvolvimento da técnica produtiva permitiu aplicar este material em áreas maiores, inicialmente por meio de tratamentos superficiais e seguidamente por meio da produção de concretos asfálticos usinados à quente. A seguir são apresentadas algumas características dos concretos asfálticos produzidos com AB.

2.7.1. Dosagem do concreto asfáltico

O asfalto borracha tem sido utilizado principalmente com faixas granulométricas descontínuas, como o *Stone Matrix Asphalt* (Oda e Fernandes Jr., 2001), o *Gap Graded* (Caltrans, 2003) ou *Open Graded* (Way, 2012). No entanto, misturas asfálticas com granulometria densa podem ser produzidas com o asfalto borracha (FHWA, 2017).

Os procedimentos laboratoriais empregados para a dosagem destas misturas são similares aos utilizados em misturas asfálticas convencionais, como os procedimentos Marshall ou SUPERPAVE. Contudo, devido à elevada viscosidade do asfalto borracha, as temperaturas de usinagem podem alcançar até os 190°C (FHWA, 2017).

Normalmente o concreto asfáltico dosado com asfalto borracha demanda maior teor de ligante asfáltico, quando comparado com concretos asfálticos produzidos com asfalto convencional. Existem duas razões principais para isso:

- a) o asfalto borracha é muito mais viscoso, portanto, a película de asfalto formada na superfície do agregado é mais espessa;
- b) as partículas de borracha que não reagiram com o ligante asfáltico, atuam como sólidos, aumentando o volume de ligante, mas não as características de adesividade.

Epps (1994) recomenda considerar 20% a mais de teor de ligante caso seja utilizado o asfalto contendo 20% de borracha em relação ao ligante. Specht (2004) notou que conforme se incrementa a porcentagem de borracha no ligante asfáltico, o teor de projeto na mistura asfáltica também aumenta.

2.7.2. Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é utilizado desde a década de 1960 e o SHRP (*Strategic Highway Research Program*) por exemplo, recomenda este parâmetro como um dos que podem ser utilizados na caracterização da mistura asfáltica. Sua popularidade é atribuída à sua simplicidade e à facilidade de empregar corpos de prova produzidos no compactador Marshall.

Usualmente o emprego de AB borracha na produção do concreto asfáltico implica a redução da resistência à tração. A redução da RT pode ser relacionada ao aumento da viscosidade do asfalto-borracha e da película de asfalto que recobre os agregados. Isso poderia interferir no intertravamento entre os agregados atuando como um lubrificante. Faxina (2002) relata valores de RT de misturas asfalto-borracha 40% menores que o valor de referência. O estudo conduzido por Specht et al. (2002) chegou a conclusões semelhantes em relação à redução do parâmetro resistência à tração.

Alguns autores não notam essa tendência, como Morilha Júnior (2004), por exemplo, que observou que a adição de borracha afeta pouco a resistência à tração na temperatura padrão de ensaios de 25°C, mas em temperaturas elevadas, as misturas com AB perdem menos resistência. Specht (2004) também notou incremento da RT com a incorporação de borracha no ligante asfáltico.

2.7.2. Rigidez do concreto asfáltico

De acordo com Bernucci et al (2008), diferentes parâmetros de rigidez têm sido utilizados para tentar caracterizar o comportamento mecânico das misturas asfálticas. O termo módulo tem sido usado de forma pouco rigorosa no meio de pavimentação pois existem conceitos bastantes distintos para ele. No Brasil o módulo de resiliência por compressão cíclica diametral é tradicionalmente utilizado por universidades e centros de pesquisa. Já nos Estados Unidos a AASHTO (2004) recomenda o emprego do módulo dinâmico. A seguir são apresentadas algumas considerações com

relação a esses parâmetros em misturas asfálticas produzidas com ligante asfáltico modificado por borracha moída de pneus.

2.7.2.1. Módulo de Resiliência

De acordo com a FHWA (2017), o módulo de resiliência de misturas asfálticas com AB tende a apresentar valores inferiores, quando comparada com misturas asfálticas produzidas com CAP convencional.

Morilha Junior (2004) e Specht (2004) também notaram que a adição de borracha no ligante asfáltico reduz o módulo de resiliência das misturas asfálticas. Para Specht (2004), essa tendência é mais acentuada para maiores teores de borracha na composição do ligante asfáltico.

Balaguer (2012) avaliou o emprego do asfalto borracha nas faixas granulométricas do tipo *Gap Graded* e *Open Graded*, como parte do seu estudo na obra da RJ-122, no Estado de Rio de Janeiro. O autor obteve valores de aproximadamente 2.500MPa para a mistura de *Open Graded*, e de 7.700MPa para a mistura de *Gap Graded*. Vale notar que os ensaios foram realizados na temperatura de 25°C.

No Quadro 2.1 é apresentado um resumo de valores de módulo de resiliência obtidos em misturas asfálticas produzidas com asfalto borracha no Brasil, em distintas universidades. Pode-se afirmar que as misturas asfálticas com AB apresentam menores valores de módulo de resiliência, quando comparadas com os ligantes asfálticos convencionais.

Segundo Bernucci et al (2002), as misturas asfálticas com asfalto borracha mostram tendência de redução de módulo de resiliência em relação às misturas com ligantes asfálticos convencionais. No entanto, essa redução não indica uma piora no comportamento dessas misturas, já que a modificação do ligante proporcionada pela borracha tende a tornar a mistura mais elástica, e normalmente, mais resistente à fadiga, apesar do módulo de resiliência da mistura ser mais baixo.

Quadro 2.1: Módulo de resiliência e resistência a tração por compressão diametral de misturas asfálticas com ligantes asfálticos convencionais e modificados por pó de borracha moída

| Fonte | Agregados | | Ligante Asfáltico | | | Projeto de Mistura | | | | Parâmetros Mecânicos | | |
|-----------------------|--------------------------|---------------|-------------------|------------------------|-----------|--------------------|------------------|------------------------------|--------------------|----------------------|---------------|------|
| | Faixa Gran. | Fonte Mineral | Tipo | Modificador | Teor (%) | Aditivo | Volume de Vazios | Produção da Mistura Afáltica | Moldagem dos CPs | MR 25°C (MPa) | RT 25°C (MPa) | |
| De Barros (2014) | Faixa "C" DNIT | - | CAP AB-8 | Borracha de pneu moída | 6.2% | - | 4.0% | Laboratório | Marshall 75 golpes | 4,249 | 0.87 | |
| Greco (2004) | Faixa "B" DNIT | Basalto | CAP 20 | - | 4.5% | - | 4.00% | Laboratório | Marshall | 11830 | 1.75 | |
| | Faixa "C" DNIT | | | | 5.0% | | | | | 3677 | 1.97 | |
| | Faixa "B" DNIT | | CAP AB | 20% Borracha | 4.5% | | | | | 14923 | 1.773 | |
| | Faixa "C" DNIT | | | | 5.0% | | | | | 4882 | 1.745 | |
| Motta (2011) | Faixa C DNIT | Granito | CAP 50/70 | Cecabase RT | 4.4% | Cal Hidratada | 4.0% | Laboratório | Marshall | 1.99 | 1.44 | |
| | Faixa C DNIT | Granito | | | CAP 30/45 | | | | | Gemul XT14 | 5.0% | 4.2% |
| | Gap Graded Caltrans 3/8" | Basalto | CAP Borracha | Gemul XT14 | | | | | | | 6.5% | |
| | | | | | 2,125 | | | | | 1.01 | | |
| Pinheiro (2004) | Faixa C DNIT | Granito | CAP-Borracha | 20% Borracha | 6.6% | Cal Hidratada | 3.9% | Laboratório | Giratório | 5,472 | 1.70 | |
| | CPA | | | | 6.0% | | | | | 20.8% | 1,723 | 0.42 |
| | SMA 0/11s | | | | 7.2% | | | | | 3.7% | 3,352 | 0.89 |
| Hirsch (2009) | Faixa B DNIT | Granito | Convencional | - | 5.0% | - | 4.0% | Laboratório | Giratório | 3,112 | 1.64 | |
| | Faixa B DNIT | | Flex 65/90 | Polímero | 5.0% | | | | | 2,999 | 1.47 | |
| | Faixa B DNIT | | CAP-Borracha | Borracha | 5.4% | | | | | 2,452 | 1.49 | |
| Morilha Junior (2004) | Faixa III DER/PR | Granito | CAP 7 | - | 5.7% | 2% CH-1 | 3.7% | Laboratório | Marshall | 3,890 | 1.24 | |
| | | | CAP 20 | - | 5.2% | | 3.7% | | | 6,877 | 1.58 | |
| | | | CAP 40 | - | 5.4% | | 3.8% | | | 6,407 | 1.68 | |
| | | | CAP 40 | 15% Borracha | 5.6% | | 3.8% | | | 3,577 | 1.44 | |
| | | | CAP 40 | 20% Borracha | 7.6% | | 3.4% | | | 4,740 | 1.18 | |

2.7.2. Módulo Dinâmico

O módulo dinâmico é um ensaio utilizado para avaliar a rigidez de misturas asfálticas em temperaturas e frequências de carregamentos distintos. Os resultados permitem avaliar, portanto, por meio da curva mestre, o comportamento de misturas asfálticas em diversas circunstâncias de clima e velocidade de tráfego.

Os estudos de Shen et al. (2014) indicam que o módulo dinâmico tende a ser maior nas misturas com ligante asfáltico modificado por borracha, em temperaturas elevadas, quando comparadas com misturas convencionais. Em testes de envelhecimento realizados em laboratório por esses autores, por meio de temperatura e radiação ultravioleta, observou-se, à luz do ensaio de módulo dinâmico que nas misturas de SMA e Open Graded o grau de envelhecimento é maior do que nas misturas densas, mas nos casos em que foi utilizado o asfalto modificado por borracha, esse efeito foi menor.

2.7.3. Resistência à deformação permanente

A deformação permanente é um defeito dos revestimentos asfálticos que pode ser atribuído à seleção inadequada dos materiais componentes da mistura asfáltica, temperaturas elevadas, projetos de dosagem deficientes e controle tecnológico inadequado. Este defeito usualmente se desenvolve no primeiro e/ou no segundo verão após construção do revestimento asfáltico. Diversos ensaios laboratoriais são empregados para prever e evitar o desenvolvimento deste defeito, tais como o simulador de trilha de rodas do tipo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*), o ensaio fluência (creep) estática e dinâmica, ensaio de *Flow Number* e até simuladores de tráfego do tipo HVS (*Heavy Vehicle Simulator*).

Camargo (2016) avaliou em laboratório as características mecânicas de uma mistura asfáltica produzida com asfalto borracha pela técnica “*just in time*” utilizada na Rodovia RJ-122 no Estado do Rio de Janeiro. Neste estudo, a granulometria da mistura asfáltica foi do tipo *Gap Graded* seguindo as especificações do departamento de transportes do Arizona (ADOT). Nos ensaios realizados no simulador do tipo LCPC com CPs moldados em laboratório, obteve afundamento de trilha de roda com níveis de deformação de 4,2%, inferior a 5%, que é o usualmente recomendado pelas especificações francesas. O autor também testou CPs extraídos de pista e os níveis de deformação foram ainda menores, quando comparados com os valores obtidos com as amostras de laboratório.

No segmento construído na RJ-122, realizaram-se também testes com o Heavy Vehicle Simulator (HVS), para avaliar a evolução da deformação permanente de forma acelerada. Os resultados de

deformação permanente indicaram que o emprego do AB estenderia a vida útil do pavimento em até 30%, até atingir valores de deformação permanente que demandassem alguma intervenção, (Balaguer, 2012).

Nos ensaios de “*creep*” dinâmico executados por Specht (2004), a deformação permanente foi menor nas misturas asfálticas produzidas com asfalto borracha, quando comparadas com as misturas convencionais. Nesse estudo, no asfalto foi incorporada a borracha moída de pneus nos teores de 12 a 18%, com relação ao peso do asfalto.

2.7.4. Resistência ao trincamento por fadiga

Diversos estudos têm estudado a vida de fadiga de misturas asfálticas com asfalto borracha. Análises laboratoriais de fadiga realizados por Raad et al (1993), por exemplo, mostraram que as misturas asfálticas com AB apresentam maior resistência à fadiga do que as misturas asfálticas convencionais. Os resultados de laboratório também foram analisados pelos pesquisadores em simulações mecanicistas e obtiveram-se coeficientes estruturais para o asfalto borracha de 1,5:1 a 3:1, quando comparados com o concreto convencional.

No estudo de Sousa et al (1999), avaliaram-se misturas asfálticas com os ligantes asfálticos convencional e modificado com 20% de borracha. Os resultados dos ensaios de fadiga mostraram que o concreto asfáltico com asfalto borracha apresentou comportamento superior em até 10 vezes do que o convencional.

De acordo com o estudo de Specht (2004), a adição de 12 a 18% de borracha ao ligante asfáltico, leva à produção de misturas com maior resistência à fadiga, quando comparada com misturas asfálticas convencionais. Os ensaios de fadiga desenvolvidos por esse autor indicam que, para o mesmo estado de tensões, qualquer uma das misturas avaliadas com asfalto borracha avaliadas pelo autor, possui um desempenho superior ao da mistura asfáltica convencional.

Camargo (2016) empregou o ensaio de flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos para avaliar as características de fadiga de misturas asfálticas com AB, com corpos de prova produzidos em laboratório e com CPs extraídos da RJ-122. Os resultados obtidos, quando comparados com outros estudos citados por esse autor, mostram que a mistura asfáltica com asfalto borracha apresenta maior resistência para resistir ao trincamento por fadiga.

2.7.5. Resistência à reflexão de trincas

As primeiras aplicações do asfalto borracha foram para constituir camadas de anti-reflexão de trincas, que podem ser do tipo SAM (*stress absorbing membrane*) ou SAMI (*stress absorbing membrane inter layer*). Estas misturas usualmente são produzidas com ligante asfáltico com 25 a 30% de borracha.

O Departamento de Transportes do Estado de Arizona (ADOT), nos Estados Unidos, desenvolveu um estudo para monitorar a ocorrência de trincas em pavimentos construídos com asfalto borracha e com ligantes asfálticos convencionais. A Figura 2.15 apresenta a evolução da reflexão de trincas em função do tempo e é notado que a área trincada é substancialmente maior no pavimento cuja mistura asfáltica não possui modificação do ligante.

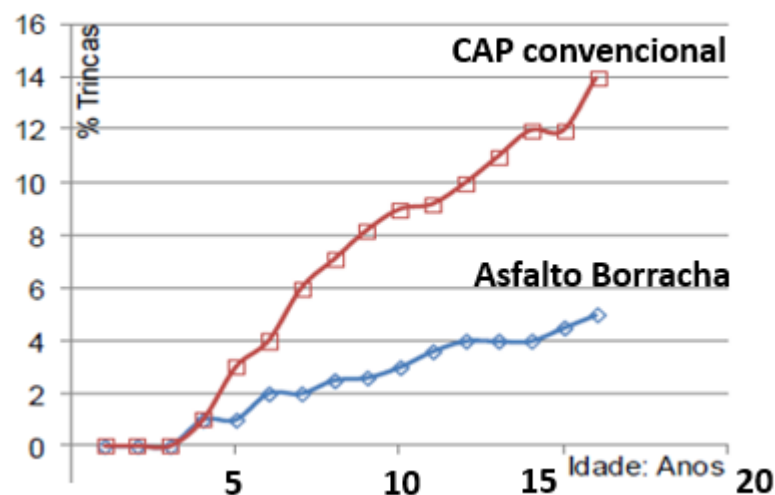


Figura 2.15: Área trincada em pavimentos construídos com asfalto borracha e ligante asfáltico convencional. FONTE: Way et al (2009)

Hirsch (2009) avaliou as características de fratura de misturas asfálticas por meio do ensaio Disk Shaped Compact (Norma ASTM D7313:2007). Esse ensaio é empregado para fornecer uma ideia da resistência da mistura asfáltica à reflexão de trincas. As granulometrias das misturas asfálticas avaliadas foram a 19mm e a 12,5mm do Superpave, com 2 ligantes asfálticos convencionais (PG 70-16 e PG 64-16), 1 SBS (PG 70-22) e 1 Borracha (PG 64-22). No ensaio realizado a 10°C observou-se energia de fratura da mistura com asfalto borracha, muito próxima da mistura com asfalto modificado por polímero. No entanto, não houve notoriedade de superioridade dessas misturas quando comparadas com os materiais convencionais.

Nos projetos desenvolvidos pela Caltrans durante mais de 40 anos, foi possível observar a redução da espessura necessária utilizada em recapeamentos asfálticos, que visavam utilizar esta camada para reduzir a reflexão de trincas, (Zhou et al 2014).

2.7.6. Durabilidade

Sousa et al (1999) mostraram, por meio de simulações laboratoriais, que as misturas asfálticas com AB sofrem menos enrijecimento pelo efeito de envelhecimento, quando comparadas com misturas asfálticas convencionais.

Specht (2004), realizou ensaios de dano por umidade induzida (DUI) e Cantabro para avaliar a durabilidade e desgaste de misturas asfálticas com AB. Os resultados do ensaio de Cantabro mostraram que as misturas com qualquer quantidade de borracha adicionada neste estudo, apresentam menor desgaste que a mistura de referência com asfalto convencional. No ensaio de dano por umidade induzida, o autor obteve nas misturas asfálticas com AB, comportamento similar ou superior à mistura convencional.

De acordo com a FHWA (2017), ensaios laboratoriais em misturas asfálticas com borracha indicam maior resistência ao envelhecimento do que misturas convencionais. Estudos também no Estado de Arizona (Estados Unidos) e observações de campo indicam maior resistência ao enrijecimento nos pavimentos construídos ou recuperados com asfalto borracha.

2.8. CUSTO

A incorporação de borracha moída de pneus no ligante asfáltico convencional gera um custo adicional na produção de misturas asfálticas. No entanto, diversos estudos têm comprovado que esse custo adicional é diluído ao longo do tempo, devido à maior durabilidade das misturas asfálticas com asfalto borracha.

Epps (1999) analisaram o custo do ciclo de vida de pavimentos para 40 anos, utilizando estratégias que incluem o emprego de asfalto borracha no concreto asfáltico, em misturas asfálticas descontínuas entre outras, e observaram que nestes casos a relação custo/benefício é muito vantajosa, quando comparada com concretos asfálticos convencionais. Os principais benefícios são notados em camadas de reforço onde a reflexão de trincas é esperada.

Na Figura 2.16, é apresentada graficamente a evolução dos custos de manutenção, conduzida pelo ADOT (*Arizona Department of Transportation*) nos Estados Unidos, comparando recapeamentos de pavimentos trincados com misturas asfálticas convencionais e com misturas asfálticas modificadas

com borracha. De acordo com Way et al (2011) observa-se que nos primeiros dois anos os custos são semelhantes, mas a partir do quinto ano, dá-se um descolamento das curvas, e os custos do asfalto borracha chegam a apresentar um decréscimo no sexto ano, enquanto a curva do HMA evolui quase que exponencialmente.

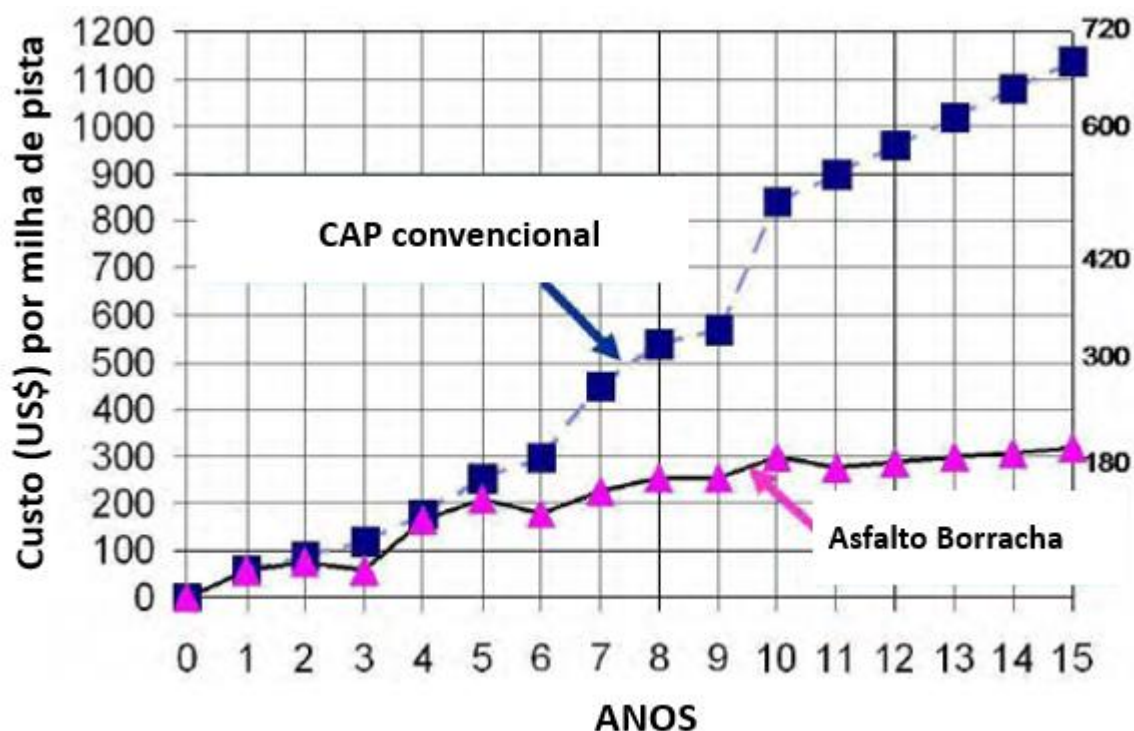


Figura 2.16: Custos de manutenção de pavimentos asfálticos reabilitados com asfalto borracha.

FONTE: Way et al (2011)

Fager (1996) indica que no Estado de Kansas, se fez uma análise de custo de algumas estratégias de recuperação de uma Rodovia Interestadual. No caso do ligante asfáltico com borracha, o investimento inicial seria 50% mais alto, com expectativa de vida superior a 27%, quando comparada à mistura convencional.

Estudos da *State University of Arizona* compararam os custos de manutenção e os custos do usuário para pavimentos convencionais e para pavimentos com concreto asfáltico com asfalto borracha. Após cinco anos, os custos não são muito diferentes para os usuários, mas após 10 anos os custos começam a ficar mais pronunciados, tanto para os custos de manutenção como para os custos dos usuários. (Jung et al, 2002)

2.9. OBSERVAÇÕES EM RODOVIAS CONSTRUÍDAS COM ASFALTO BORRACHA

Alguns estudos envolvendo asfalto borracha focaram-se em acompanhar o desempenho de segmentos rodoviários construídos com este ligante asfáltico, tanto no Brasil como no exterior. Alguns dos principais estudos são detalhados a seguir.

Saboundjian e Raad (1997) investigaram trechos construídos no Estado de Alaska entre os anos 70 e 80 com e sem o uso de AB. Nas avaliações de campo e de laboratório observaram que os segmentos com AB apresentaram melhor desempenho para resistir ao trincamento térmico.

Larsen (1989) avaliou segmentos de pavimentos no Estado de Connecticut, nos quais foi aplicado um recapeamento com AB e com ligante asfáltico convencional. O autor observou que nos locais em que foi aplicado o AB, a reflexão de trincas foi menor, quando comparado com o asfalto convencional e, nos casos em que houve reflexão de trincas, a severidade também foi inferior.

O Departamento de Transportes da Flórida (FDOT), construiu três segmentos de um pavimento utilizando uma mistura densa convencional e duas misturas “*open graded*” com asfalto borracha. Durante anos de monitoramento, observou-se que os segmentos com AB apresentaram durabilidade superior às misturas convencionais, com maior resistência ao atrito dos pneus dos veículos com o pavimento, (FHWA, 2017).

Epps (1997) simulou em laboratório as oscilações térmicas de desertos norte americanos, e submeteu a esse condicionamento misturas asfálticas com ligantes asfálticos convencionais e modificados por borracha. Os resultados constataram que a incorporação de borracha produziu melhorias quanto a durabilidade das misturas asfálticas com borracha.

Way (2000) relata o emprego de AB no recapeamento de um pavimento de concreto no Estado do Arizona, sujeito a oscilações térmicas de -31°C no inverno, até 27°C no verão. O recapeamento consistiu em 7,5cm de concreto asfáltico com CAP convencional e mais 5cm com AB, totalizando 12,5cm. O custo de produção da mistura com AB foi superior em 100% mas, nos 9 anos de monitoramento, não houve nenhum registro de fissuras nem deformação permanente excessiva e as condições de rolamento se mantiveram bastante satisfatórias.

O Departamento de Transportes da Arizona (ADOT) utiliza o asfalto borracha desde a década de 1970, em misturas asfálticas de faixa granulométrica descontínua do tipo “*Gap Graded*”, especialmente definida para emprego de asfalto borracha, chamada de ARAC (*Asphalt Rubber Asphaltic Concrete*). Também têm sido aplicada com camada antireflexão de trincas (SAMI), ou como camada para melhorar as características do atrito dos pneus dos veículos com a superfície do

pavimento, com o emprego de misturas asfálticas chamadas de ARFC (*Asphalt Rubber Friction Course*). Estudos de Way et al. (2011), mostram que, nesse período de avaliação, o afundamento de trilha de roda (ATR) foi notoriamente inferior no segmento com asfalto borracha, com valores inferiores a 6mm, que é um valor considerado baixo sem maiores riscos para o usuário, (Way et al, 2011).

Levantamentos da irregularidade do ADOT também têm mostrado que nos segmentos construídos com asfalto borracha, o IRI tem se mantido baixo, permanecendo em patamares inferiores a 1,5m/km, (Way et al, 2011).

O Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans), utiliza usualmente as misturas asfálticas com faixa granulométrica do tipo “*Gap Graded*” e “*Open Graded*”, para reabilitar os pavimentos asfálticos ou de concreto de cimento Portland. Na década de 1980 a Caltrans desenvolveu um estudo para recuperar pavimentos deteriorados, com a superfície trincada, empregando asfalto convencional e asfalto borracha em distintas espessuras. Os resultados do monitoramento ao longo dos anos mostraram que o emprego de camadas delgadas com asfalto borracha, tem mais eficiência em resistir à reflexão de trincas do que camadas mais espessas com asfalto convencional, (Caltrans 2003). O Manual de Reabilitação da Caltrans de 2001, apresenta uma tabela de equivalências para recapeamentos com asfalto convencional e asfalto borracha, e apresenta a possibilidade de utilizar espessuras de até a metade no caso do asfalto borracha, para recapeamentos de pavimentos deteriorados, (Caltrans, 2003).

Shuler (2011) realizou o acompanhamento de pistas construídas no Estado de Colorado com asfalto borracha e ligante asfáltico comum, todos atendendo à especificação para um PG 64-28. Um segmento foi construído com asfalto borracha produzido pela técnica “*terminal blend*”, enquanto que o outro segmento foi executado com asfalto borracha pela metodologia “*just in time*”. Cada um dos segmentos foi construído na espessura de 3,0cm sobre a superfície de um pavimento previamente fresado a frio. As observações após dois anos de construção do segmento indicam comportamento similar nos três segmentos construídos. O autor observou que o custo de construção dos segmentos com AB foi superior, mas quando é analisada a vida útil do pavimento, e os custos de manutenção necessários par o CAP comum, obtêm-se custos atuais mais atraentes para o asfalto borracha.

No segmento construído na RJ-122, por exemplo, realizaram-se testes com o Heavy Vehicle Simulator (HVS), para avaliar a evolução da deformação permanente de forma acelerada. Os

resultados de deformação permanente indicaram que o emprego do AB estenderia a vida útil do pavimento em 30%, até atingir valores de deformação permanente que demandassem alguma intervenção, (Balaguer, 2012)

Camargo (2016) empregou um simulador de tráfego pesado (HVS, Heavy Vehicle Simulator), para avaliar a deformação de um revestimento asfáltico com AB, do tipo gap graded, produzido pela técnica “*just in time*”, na Rodovia RJ-122, no Estado do Rio de Janeiro. Os ensaios foram realizados até atingir um número N de $2,47 \times 10^6$ repetições do eixo padrão, equivalente a 7 anos de projeto, para o tráfego daquela rodovia. Os máximos valores encontrados, para o tráfego correspondente a 7 anos, atingiram o afundamento de trilha de roda de 4,2mm, que pode ser considerado baixo, de acordo com os valores usualmente adotados no Brasil. Após finalização do emprego do HVS, o autor não observou trincamentos na superfície dos pavimentos, indicando que após um tráfego correspondente a 7 anos do projeto, não teria sido atingido ainda a vida de fadiga.

Como pode ser observado nesta revisão bibliográfica, são muitos os ganhos e benefícios mecânicos que podem ser obtidos do emprego do asfalto borracha em misturas asfálticas. Nos próximos capítulos serão abordados os ensaios realizados em laboratório para estudos os ligantes asfálticos modificados por borracha e as misturas asfálticas produzidas com estes materiais.

3. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS (ETAPA B E ETAPA E)

Nesta etapa foi realizada uma análise laboratorial dos produtos disponíveis no mercado nacional por meio da caracterização tradicional recomendada pelo DNIT 111/2009 e pela metodologia SUPERPAVE, para avaliar o comportamento reológico dos materiais.

Para execução desta etapa foram selecionados quatro ligantes asfálticos modificados por pó de borracha moída de quatro fornecedores nacionais distintos, identificados conforme apresentado na Tabela 3.1. Além disso, também foram selecionados o CAP 30/45 e o CAP 50/70 para este estudo, para serem utilizados como base comparativa.

Tabela 3.1: Identificação dos ligantes asfálticos estudados na ETAPA B deste estudo

| Ligante Asfáltico | ID |
|---|------------|
| Modificado por pó de borracha moída do Fornecedor 1 | CAP-Borr-1 |
| Modificado por pó de borracha moída do Fornecedor 2 | CAP-Borr-2 |
| Modificado por pó de borracha moída do Fornecedor 3 | CAP-Borr-3 |
| Modificado por pó de borracha moída do Fornecedor 4 | CAP-Borr-4 |
| CAP 30/45 | CAP 30/45 |
| CAP 50/70 | CAP 50/70 |

3.1. CARACTERIZAÇÃO CONVENCIONAL

Inicialmente os ligantes asfálticos selecionados foram caracterizados de acordo com as especificações tradicionalmente empregadas no Brasil. Os resultados da caracterização desses ligantes asfálticos são apresentados nas Tabelas 3.2 a 3.6.

Tabela 3.2: Caracterização do CAP modificado por borracha do Fornecedor 1

| Características | Unidades | CAP-Borr-1 | Especificação (*) | Métodos de Ensaio |
|---|-------------------|------------|-------------------|-------------------|
| | | | Borracha AB (8) | |
| Densidade Relativa, 25°C | g/dm ³ | 1,027 | 1,00 - 1,05 | DNER ME-193 |
| Viscosidade Brookfield a 160°C, 20 rpm, spindle 3 | cP | 2250 | - | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 175°C, 20rpm, spindle 3 | cP | 1470 | 800 - 2000 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 185°C, 20rpm, spindle 3 | cP | 950 | - | ABNT NBR 15184 |
| Recuperação Elástica Torciômetro 25°C, 30min | % | 70 | mínimo 60 | NLT 329/91 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen) | 0,1mm | 57 | 30 - 70 | ABNT NBR 6576 |
| Ponto de Amolecimento (Pa) | °C | 59 | mínimo 50 | NBR 6560 |

Tabela 3.3: Caracterização do CAP modificado por borracha do Fornecedor 2

| Características | Unidades | CAP-Borr-2 | Especificação (*) | Métodos de Ensaio |
|---|-------------------|------------|-------------------|-------------------|
| | | | Borracha AB (8) | |
| Densidade Relativa, 25°C | g/dm ³ | 1,026 | 1,00 - 1,05 | DNER ME-193 |
| Viscosidade Brookfield a 160°C, 20 rpm, spindle 3 | cP | 2140 | - | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 175°C, 20rpm, spindle 3 | cP | 1360 | 800 - 2000 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 185°C, 20rpm, spindle 3 | cP | 840 | - | ABNT NBR 15184 |
| Recuperação Elástica Torciômetro 25°C, 30min | % | 62 | mínimo 60 | NLT 329/91 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen) | 0,1mm | 44 | 30 - 70 | ABNT NBR 6576 |
| Ponto de Amolecimento (Pa) | °C | 57 | mínimo 50 | NBR 6560 |

Tabela 3.4: Caracterização do CAP modificado por borracha do Fornecedor 3

| Características | Unidades | CAP-Borr-3 | Especificação (*) | Métodos de Ensaio |
|---|-------------------|------------|-------------------|-------------------|
| | | | Borracha AB (8) | |
| Densidade Relativa, 25°C | g/dm ³ | 1,025 | 1,00 - 1,05 | DNER ME-193 |
| Viscosidade Brookfield a 160°C, 20 rpm, spindle 3 | cP | 2255 | - | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 175°C, 20rpm, spindle 3 | cP | 1475 | 800 - 2000 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 185°C, 20rpm, spindle 3 | cP | 955 | - | ABNT NBR 15184 |
| Recuperação Elástica Torciômetro 25°C, 30min | % | 65 | mínimo 60 | NLT 329/91 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen) | 0,1mm | 45 | 30 - 70 | ABNT NBR 6576 |
| Ponto de Amolecimento (Pa) | °C | 60 | mínimo 50 | NBR 6560 |

Tabela 3.5: Caracterização do CAP modificado por borracha do Fornecedor 4

| Características | Unidades | CAP-Borr-4 | Especificação (*) | Métodos de Ensaio |
|---|-------------------|------------|-------------------|-------------------|
| | | | Borracha AB (8) | |
| Densidade Relativa, 25°C | g/dm ³ | 1,026 | 1,00 - 1,05 | DNER ME-193 |
| Viscosidade Brookfield a 160°C, 20 rpm, spindle 3 | cP | 2290 | - | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 175°C, 20rpm, spindle 3 | cP | 1510 | 800 - 2000 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 185°C, 20rpm, spindle 3 | cP | 990 | - | ABNT NBR 15184 |
| Recuperação Elástica Torciômetro 25°C, 30min | % | 65 | mínimo 60 | NLT 329/91 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen) | 0,1mm | 43 | 30 - 70 | ABNT NBR 6576 |
| Ponto de Amolecimento (Pa) | °C | 61 | mínimo 50 | NBR 6560 |

Tabela 3.6: Caracterização do CAP 30/45

| Características | Unidades | Resultados | Especificação (*) | Métodos de Ensaio |
|--|-------------------|------------|-------------------|-------------------|
| | | | CAP 30/45 | |
| Densidade | g/dm ³ | 1,003 | - | DNER ME-193 |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm, spindle 21 | cP | 490 | mínimo 374 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, 20rpm, spindle 21 | cP | 238 | mínimo 203 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, 100rpm, spindle 21 | cP | 84 | 76 - 285 | ABNT NBR 15184 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen) | 0,1mm | 34 | 30 - 45 | ABNT NBR 6576 |
| Ponto de Amolecimento (Pa) | °C | 53 | mínimo 52 | ABNT NBR 6560 |
| Índice de Susceptibilidade Térmica (I) | - | -1,3 | (-1,5) a (+0,7) | ANP-R19 |
| Espuma a 177°C | - | negativo | negativo | ANP-R19 |

Tabela 3.7: Caracterização do CAP 50/70

| Características | Unidades | Resultados | Especificação (*) | Métodos de Ensaio |
|--|-------------------|------------|-------------------|-------------------|
| | | | CAP 50/70 | |
| Densidade | g/dm ³ | 1,006 | - | DNER ME-193 |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, 20 rpm, spindle 21 | cP | 310 | mínimo 274 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, 50rpm, spindle 21 | cP | 156 | mínimo 112 | ABNT NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, 100rpm, spindle 21 | cP | 58 | 57 - 285 | ABNT NBR 15184 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (Pen) | 0,1mm | 53 | 50 - 70 | ABNT NBR 6576 |
| Ponto de Amolecimento (Pa) | °C | 49 | mínimo 46 | ABNT NBR 6560 |
| Índice de Susceptibilidade Térmica (I) | - | -1,4 | (-1,5) a (+0,7) | ANP-R19 |
| Espuma a 177°C | - | negativo | negativo | ANP-R19 |

Nas Figuras 3.1 a 3.5 são apresentados gráficos comparativos dos ligantes asfálticos modificados por borracha, para os distintos parâmetros considerados pelas especificações convencionais. Nota-se que todos os materiais selecionados atendem aos limites estabelecidos pela Norma DNIT 111/2009-EM.

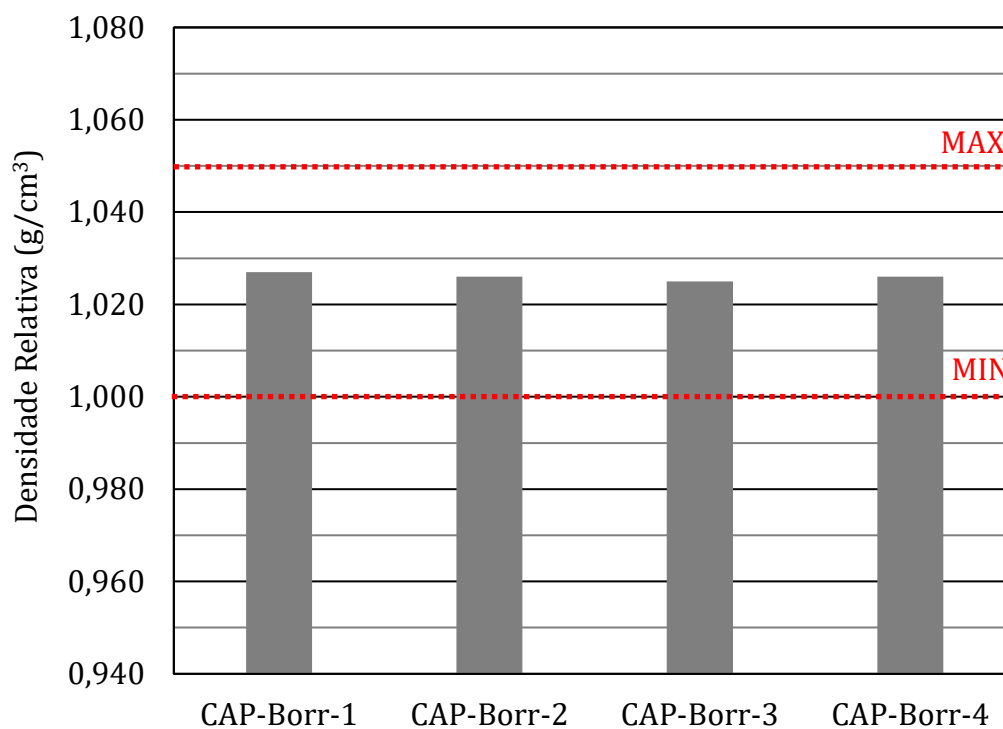


Figura 3.1: Resultados de Densidade dos ligantes asfálticos modificados por borracha

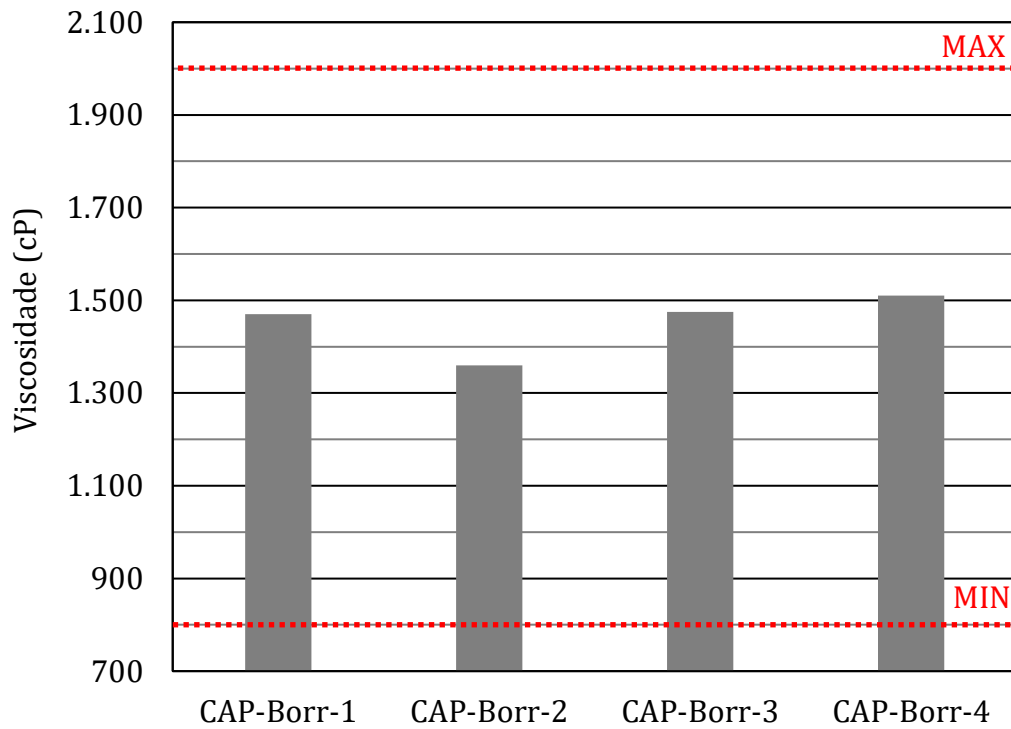


Figura 3.2: Resultados da Viscosidade Brookfield a 175°C, com *spindle* 3 e 20rpm

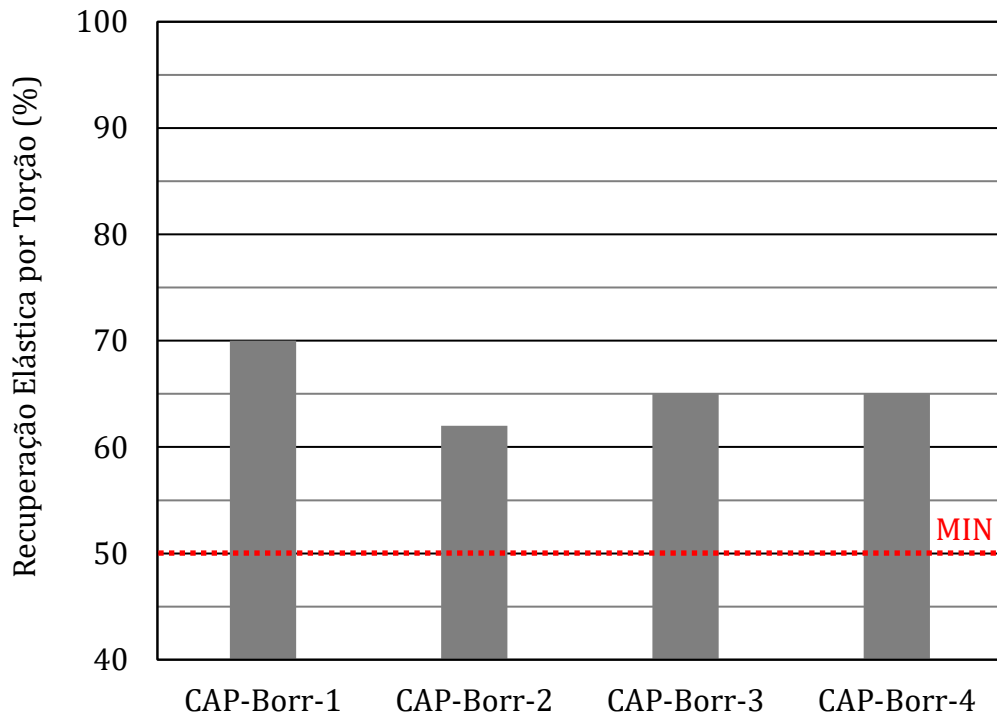


Figura 3.3: Resultados do ensaio de recuperação elástica por torção a 25°C, após 30min

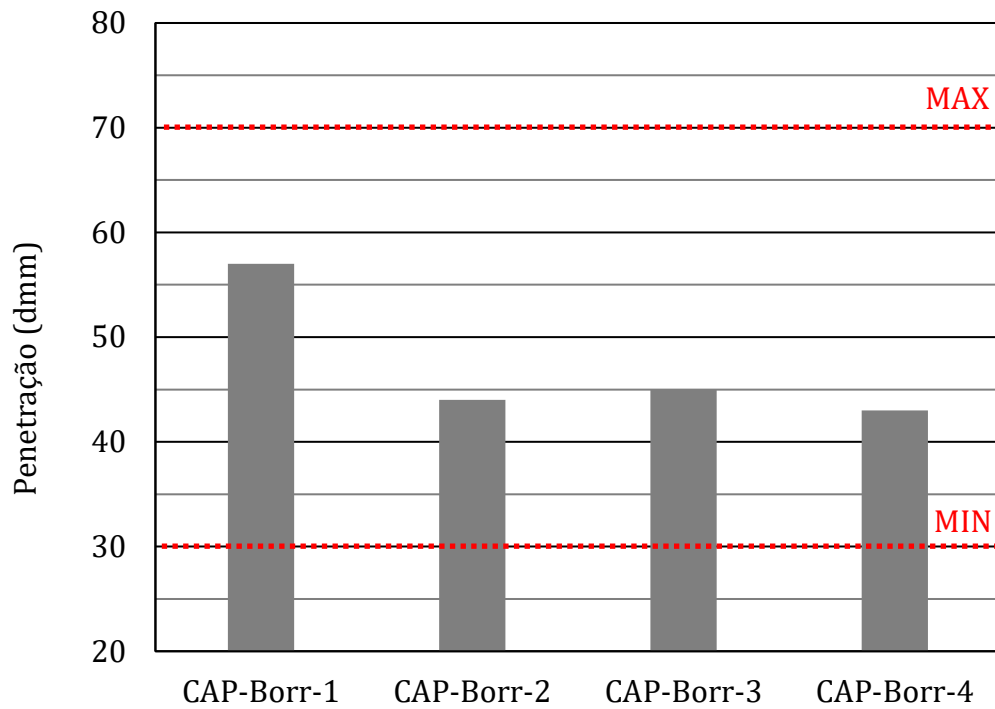


Figura 3.4: Resultados do ensaio de penetração na temperatura de 25°C

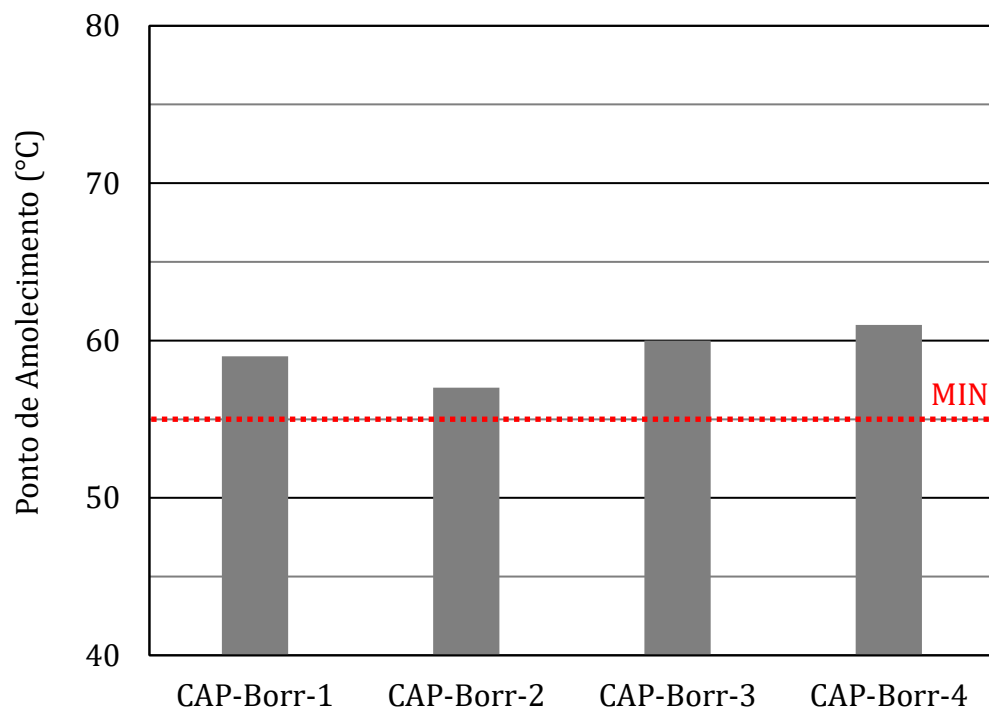


Figura 3.5: Resultados do ensaio de ponto de anel e bola

3.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

Para caracterização reológica dos materiais selecionados foram executados ensaios de acordo com a metodologia norte americana *SUPERPAVE*. As normativas ASTM e AASHTO foram empregadas para execução desses ensaios no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) marca *TA Instruments* Modelo DHR-1, do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra conforme ilustrado na Figura 3.6. Os resultados desses ensaios reológicos são apresentados nos itens seguintes.

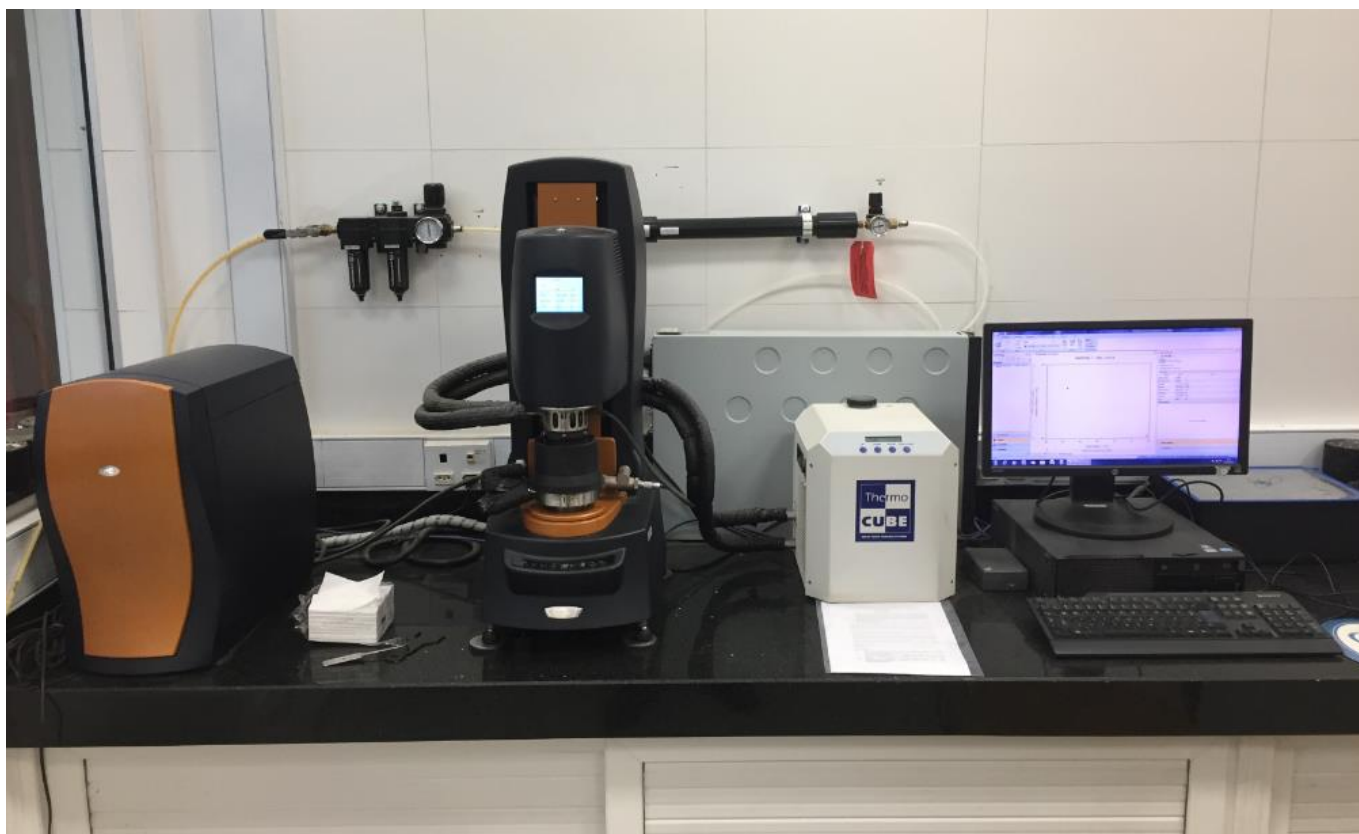


Figura 3.6: Reômetro de cisalhamento dinâmico utilizado no Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra

3.2.1. Determinação do Grau de Desempenho (PG)

Para determinação do Grau de Desempenho (PG) dos ligantes asfálticos é necessário determinar o módulo complexo de cisalhamento (G^*) e o ângulo de fase (δ), em amostra virgem e em amostra envelhecida no RTFOT. Esses parâmetros são obtidos no reômetro de cisalhamento dinâmico pela aplicação de tensões de cisalhamento oscilatório na frequência de 10 rad/s em uma pequena amostra disposta entre duas placas paralelas, na temperatura de 58°C e intervalos crescentes de

6°C. O grau de desempenho do ligante asfáltico é definido pelo parâmetro $G^*/\sin(\delta)$, conforme apresentado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Valores do parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ para determinação do grau de desempenho dos ligantes asfálticos

| Condição da Amostra | $G^*/\sin(d)$ |
|----------------------------|---------------------------------|
| Virgem | > 1,0kPa |
| Envelhecida no RTFOT | > 2,2kPa |

Os resultados deste ensaio são apresentados nas Tabelas 3.9 a 3.14 e nas Figuras 3.7 a 3.12, para todos os materiais analisados neste estudo.

Tabela 3.9: Resultados do ensaio para determinação do PG do CAP-Borr-1

| Temperatura de Ensaio (°C) | Amostra Virgem | | | Amostra Envelhecida RTFOT | | |
|----------------------------|-----------------|----------------|--------------------------|---------------------------|----------------|--------------------------|
| | Módulo Complexo | Ângulo de Fase | $G^*/\text{sen}(\delta)$ | Módulo Complexo | Ângulo de Fase | $G^*/\text{sen}(\delta)$ |
| | G* (Pa) | δ (°) | (kPa) | G* (Pa) | δ (°) | (kPa) |
| 58 | 8.512 | 64 | 9,468 | 14.875 | 61 | 16,856 |
| 64 | 4.819 | 66 | 5,265 | 8.156 | 62 | 9,105 |
| 70 | 2.793 | 69 | 2,994 | 4.642 | 64 | 5,088 |
| 76 | 1.676 | 71 | 1,776 | 2.709 | 67 | 2,915 |
| 82 | 1.033 | 73 | 1,081 | 1.591 | 69 | 1,682 |
| 88 | 647 | 76 | 0,668 | 952 | 71 | 0,991 |
| 94 | 412 | 78 | 0,420 | 579 | 74 | 0,596 |

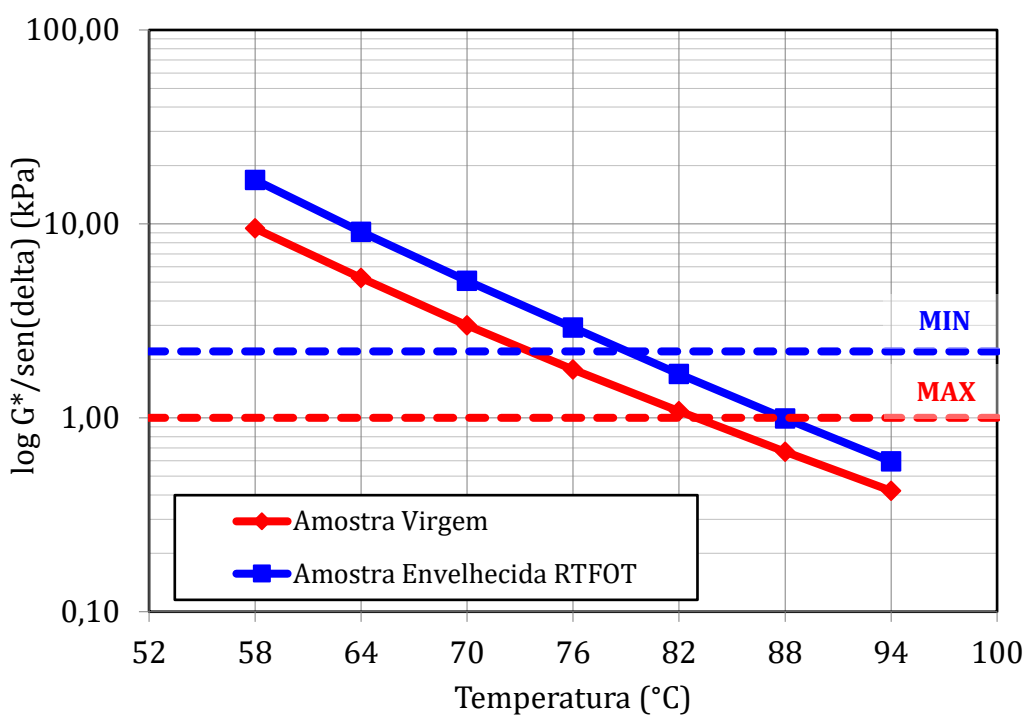

 Figura 3.7: $G^*/\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio, para a amostra virgem e amostra envelhecida no RTFTOT do CAP-Borr-1

Tabela 3.10: Resultados do ensaio para determinação do PG do CAP-Borr-2

| Temperatura de Ensaio (°C) | Amostra Virgem | | | Amostra Envelhecida RTFOT | | |
|----------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|---------------------------|----------------------|-----------------|
| | Módulo Complexo G* (Pa) | Ângulo de Fase δ (°) | G*/sen(δ) (kPa) | Módulo Complexo G* (Pa) | Ângulo de Fase δ (°) | G*/sen(δ) (kPa) |
| 58 | 8.122 | 65 | 8,984 | 13.481 | 61 | 15,404 |
| 64 | 4.569 | 67 | 4,969 | 7.748 | 62 | 8,750 |
| 70 | 2.617 | 70 | 2,793 | 4.511 | 64 | 5,011 |
| 76 | 1.553 | 72 | 1,636 | 2.773 | 66 | 3,038 |
| 82 | 923 | 74 | 0,959 | 1.681 | 68 | 1,812 |
| 88 | 560 | 77 | 0,574 | 1.116 | 70 | 1,186 |
| 94 | 348 | 80 | 0,353 | 728 | 72 | 0,764 |

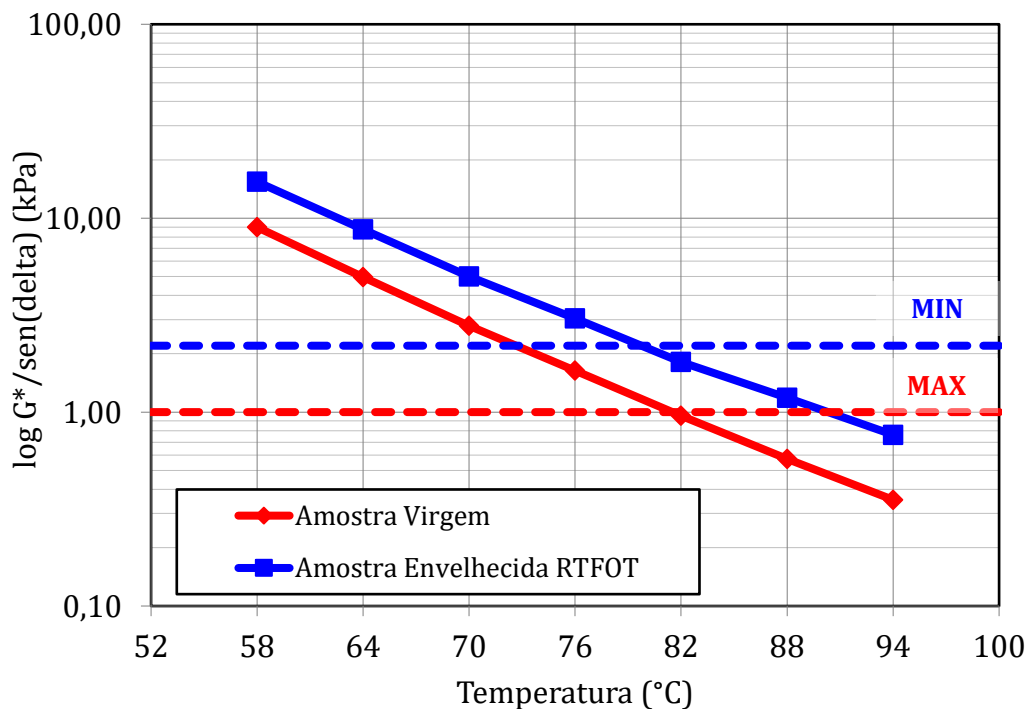

 Figura 3.8: $G^*/\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio, para a amostra virgem e amostra envelhecida no RTFTOT do CAP-Borr-2

Tabela 3.11: Resultados do ensaio para determinação do PG do CAP-Borr-3

| Temperatura de Ensaio (°C) | Amostra Virgem | | | Amostra Envelhecida RTFOT | | |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | Módulo Complexo G* (Pa) | Ângulo de Fase δ (°) | G*/sen(δ) (kPa) | Módulo Complexo G* (Pa) | Ângulo de Fase δ (°) | G*/sen(δ) (kPa) |
| 58 | 7.540 | 67,000 | 8,168 | 14.199 | 62 | 16,107 |
| 64 | 4.065 | 71,000 | 4,306 | 7.772 | 64 | 8,679 |
| 70 | 2.250 | 74,000 | 2,337 | 4.351 | 66 | 4,766 |
| 76 | 1.267 | 77,000 | 1,302 | 2.494 | 68 | 2,683 |
| 82 | 733 | 79,000 | 0,745 | 1.491 | 71 | 1,578 |
| 88 | 438 | 82,000 | 0,442 | 894 | 73 | 0,933 |
| 94 | 272 | 84,000 | 0,273 | 550 | 76 | 0,566 |

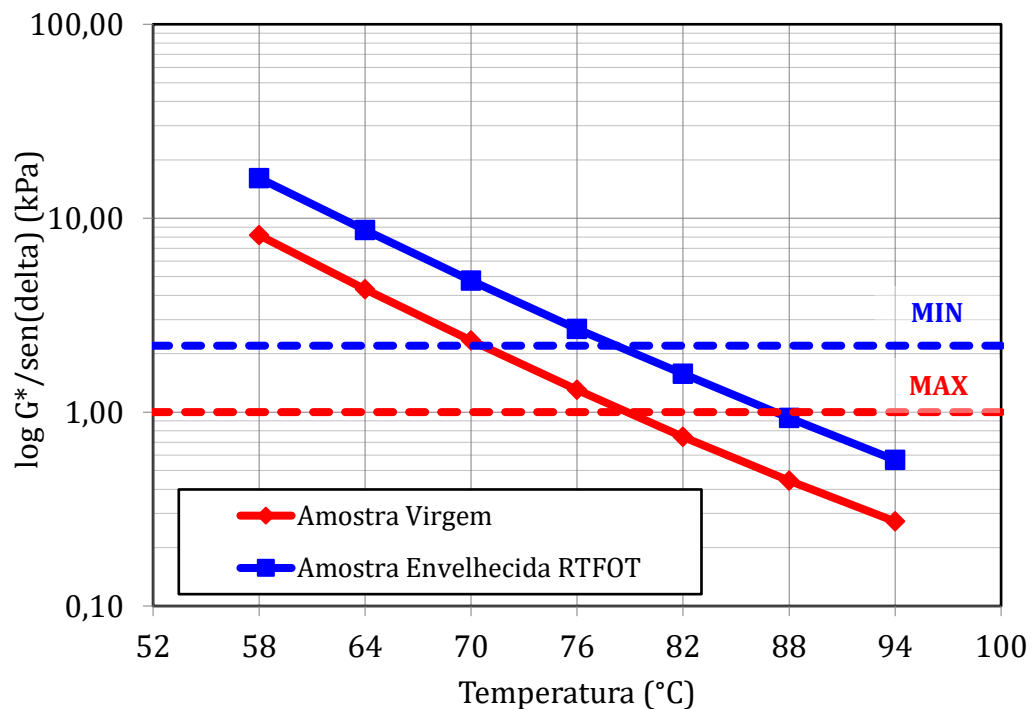

 Figura 3.9: G*/sen(δ) em função da temperatura de ensaio, para a amostra virgem e amostra envelhecida no RTFTOT do CAP-Borr-3

Tabela 3.12: Resultados do ensaio para determinação do PG do CAP-Borr-4

| Temperatura de Ensaio (°C) | Amostra Virgem | | | Amostra Envelhecida RTFOT | | |
|----------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|---------------------------|----------------------|-----------------|
| | Módulo Complexo G* (Pa) | Ângulo de Fase δ (°) | G*/sen(δ) (kPa) | Módulo Complexo G* (Pa) | Ângulo de Fase δ (°) | G*/sen(δ) (kPa) |
| 58 | 8.623 | 65 | 9,478 | 17.696 | 63 | 19,912 |
| 64 | 4.742 | 67 | 5,152 | 9.394 | 64 | 10,480 |
| 70 | 2.693 | 69 | 2,886 | 5.187 | 65 | 5,716 |
| 76 | 1.547 | 71 | 1,638 | 2.917 | 67 | 3,170 |
| 82 | 896 | 73 | 0,936 | 1.683 | 69 | 1,801 |
| 88 | 540 | 76 | 0,556 | 1.025 | 71 | 1,081 |
| 94 | 332 | 79 | 0,339 | 633 | 74 | 0,659 |

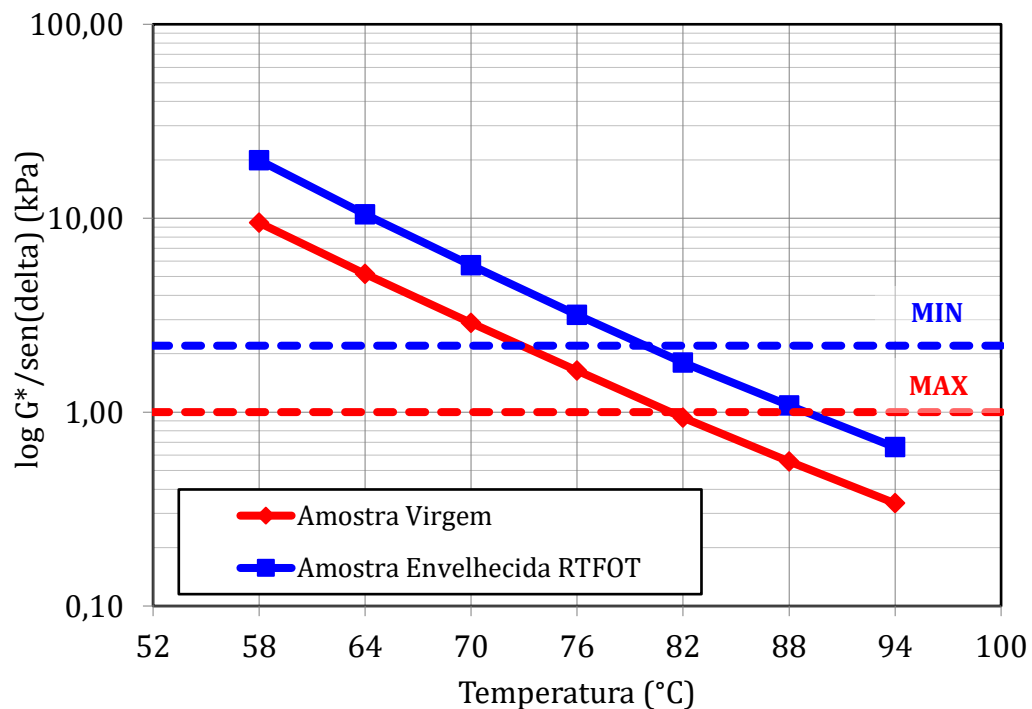

 Figura 3.10: $G^*/\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio, para a amostra virgem e amostra envelhecida no RTFTOT do CAP-Borr-4

Tabela 3.13: Resultados do ensaio para determinação do PG do CAP 30/45

| Temperatura de Ensaio (°C) | Amostra Virgem | | | Amostra Envelhecida RTFOT | | |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | Módulo Complexo G* (Pa) | Ângulo de Fase δ (°) | G*/sen(δ) (kPa) | Módulo Complexo G* (Pa) | Ângulo de Fase δ (°) | G*/sen(δ) (kPa) |
| 58 | 4.845 | 87 | 4,856 | 9.245 | 83 | 9,315 |
| 64 | 2.044 | 88 | 2,046 | 3.864 | 85 | 3,880 |
| 70 | 906 | 88 | 0,907 | 1.681 | 86 | 1,685 |
| 76 | 431 | 89 | 0,431 | 777 | 87 | 0,778 |
| 82 | 219 | 89 | 0,219 | 380 | 88 | 0,380 |
| 88 | 120 | 89 | 0,120 | 200 | 89 | 0,200 |
| 94 | 69 | 89 | 0,069 | 112 | 89 | 0,112 |

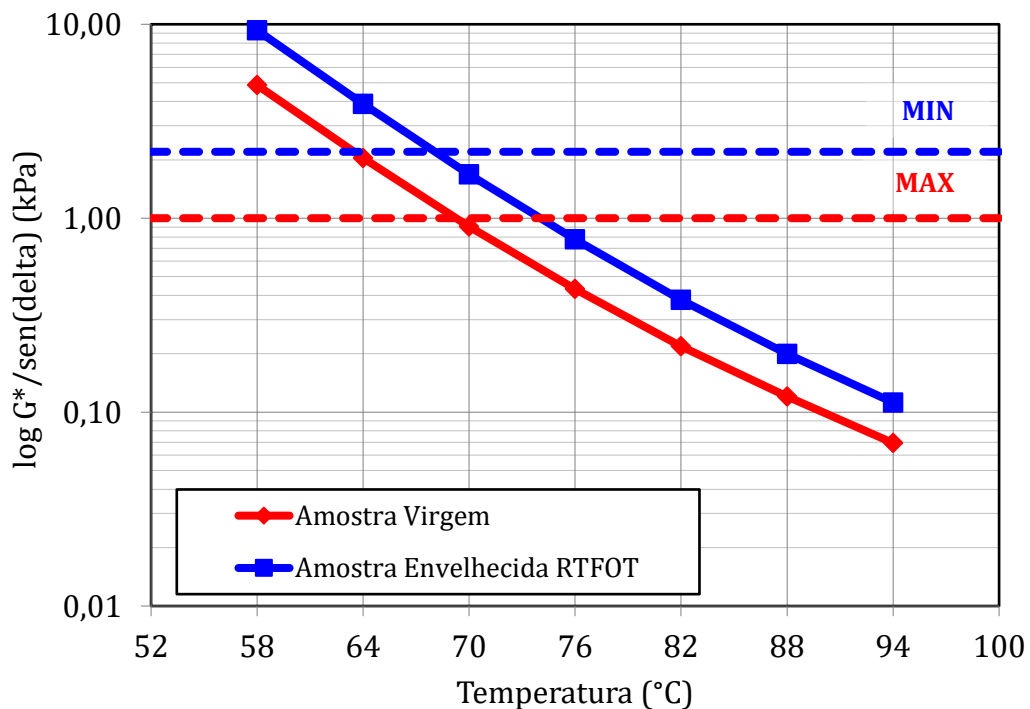

 Figura 3.11: G*/sen(δ) em função da temperatura de ensaio, para a amostra virgem e amostra envelhecida no RTFTOT do CAP 30/45

Tabela 3.14: Resultados do ensaio para determinação do PG do CAP 50/70

| Temperatura de Ensaio (°C) | Amostra Virgem | | | Amostra Envelhecida RTFOT | | |
|----------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|---------------------------|----------------------|-----------------|
| | Módulo Complexo G* (Pa) | Ângulo de Fase δ (°) | G*/sen(δ) (kPa) | Módulo Complexo G* (Pa) | Ângulo de Fase δ (°) | G*/sen(δ) (kPa) |
| 58 | 3.192 | 87 | 3,198 | 6.212 | 83 | 6,241 |
| 64 | 1.395 | 88 | 1,396 | 2.616 | 85 | 2,623 |
| 70 | 646 | 88 | 0,646 | 1.162 | 86 | 1,164 |
| 76 | 316 | 89 | 0,316 | 547 | 88 | 0,548 |
| 82 | 163 | 89 | 0,163 | 275 | 89 | 0,275 |
| 88 | 91 | 90 | 0,091 | 150 | 89 | 0,150 |
| 94 | 54 | 90 | 0,054 | 85 | 89 | 0,085 |

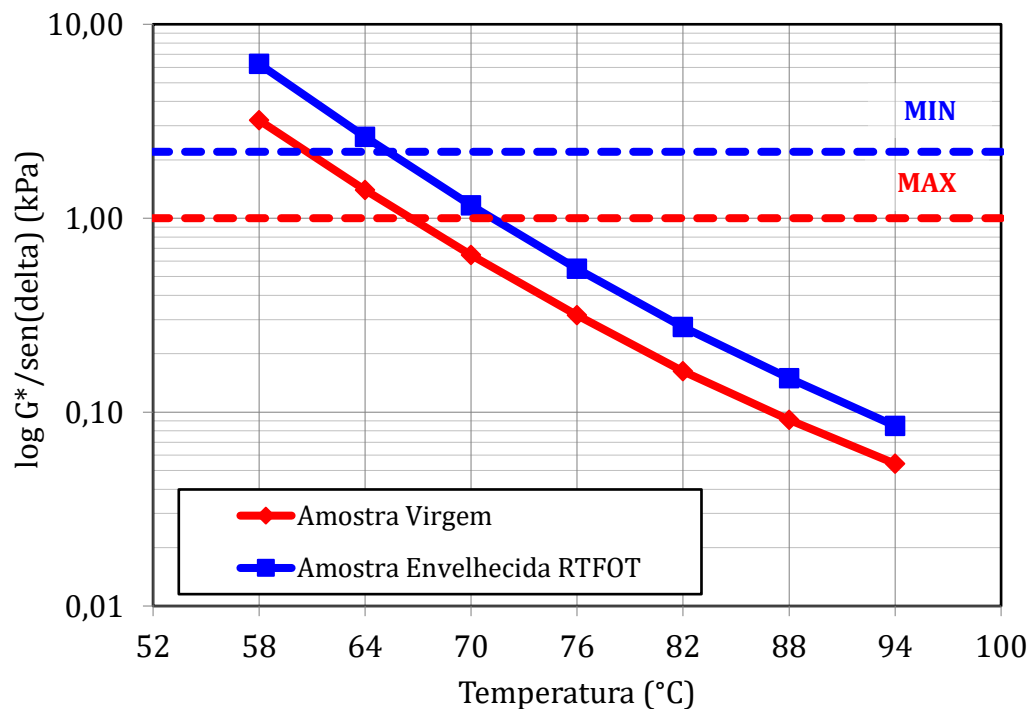


Figura 3.12: G*/sen(δ) em função da temperatura de ensaio, para a amostra virgem e amostra envelhecida no RTFTOT do CAP 50/70

Na Tabela 3.15 e na Figura 3.13 é apresentada a determinação do grau de desempenho dos materiais estudados. Nota-se que os ligantes asfálticos apresentam igual PG, de 76°C, o que indicaria que misturas asfálticas produzidas com este ligante, resistiriam de forma satisfatória ao fenômeno de deformação permanente até a temperatura de 76°C. Já o CAP 30/45 e o CAP 50/70 obtiveram PG inferior, de 70°C e 64°C, respectivamente.

Tabela 3.15: Resumo do grau de desempenho dos materiais estudados

| Amostra | CAP- Borr-1 | CAP- Borr-2 | CAP- Borr-3 | CAP- Borr-4 | CAP 30/45 | CAP 50/70 |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|
| PG (°C) | 76 | 76 | 76 | 76 | 70 | 64 |
| PG Verdadeiro (°C) | 78,3 | 79,5 | 77,7 | 79,5 | 70,9 | 65,2 |

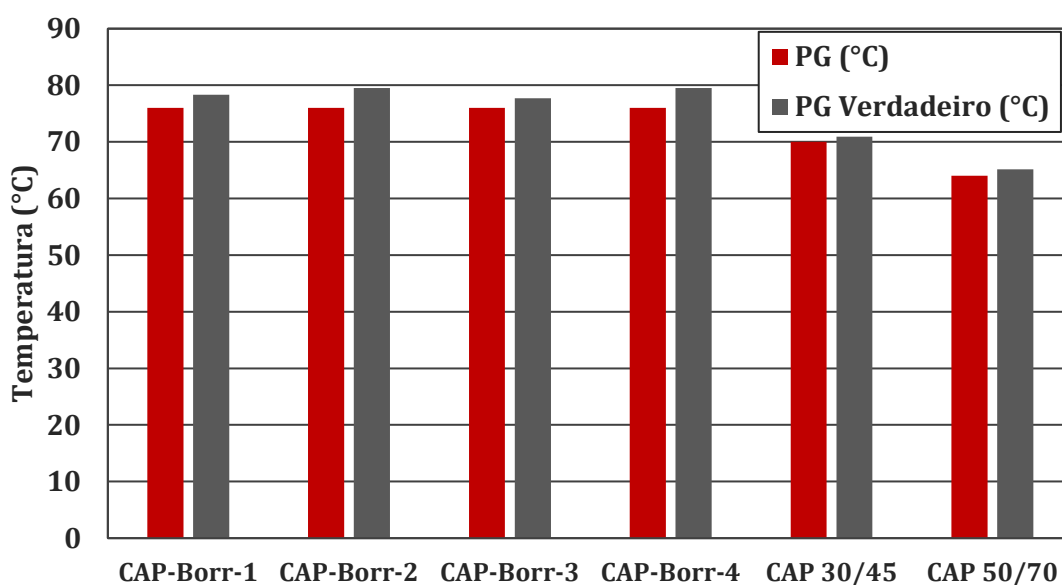


Figura 3.13: Grau de desempenho dos materiais estudados

Na Tabela 3.16 apresenta-se um resumo comparativo dos parâmetros módulo dinâmico, ângulo de fase e $G^* \sin(\delta)$, dos materiais estudados na temperatura de 76°C. Observa-se nessa Tabela e na Figura 3.14 que o módulo dinâmico é similar nas quatro amostras de asfalto borracha, e superior aos valores obtidos nos ligantes asfálticos CAP 30/45 e CAP 50/70. Como era esperado, o efeito do envelhecimento das amostras na estufa RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), enrijeceu as amostras analisadas.

Tabela 3.16: Módulo dinâmico (G^*), Ângulo de Fase (δ) e $G^*/\text{sen}(\delta)$ dos materiais estudados na temperatura de 76°C

| Amostra | Condicionamento | CAP- | CAP- | CAP- | CAP- | CAP | CAP |
|--------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | | Borr-1 | Borr-2 | Borr-3 | Borr-4 | 30/45 | 50/70 |
| G^* | Virgem | 1.676 | 1.553 | 1.267 | 1.547 | 431 | 316 |
| (Pa) | RTFOT | 2.709 | 2.773 | 2.494 | 2.917 | 777 | 547 |
| (δ) | Virgem | 71 | 72 | 77 | 71 | 89 | 89 |
| (°) | RTFOT | 67 | 66 | 68 | 67 | 87 | 88 |
| $G^*/\text{sen}(\delta)$ | Virgem | 1,776 | 1,636 | 1,302 | 1,638 | 0,431 | 0,316 |
| (kPa) | RTFOT | 2,915 | 3,038 | 2,683 | 3,170 | 0,778 | 0,548 |

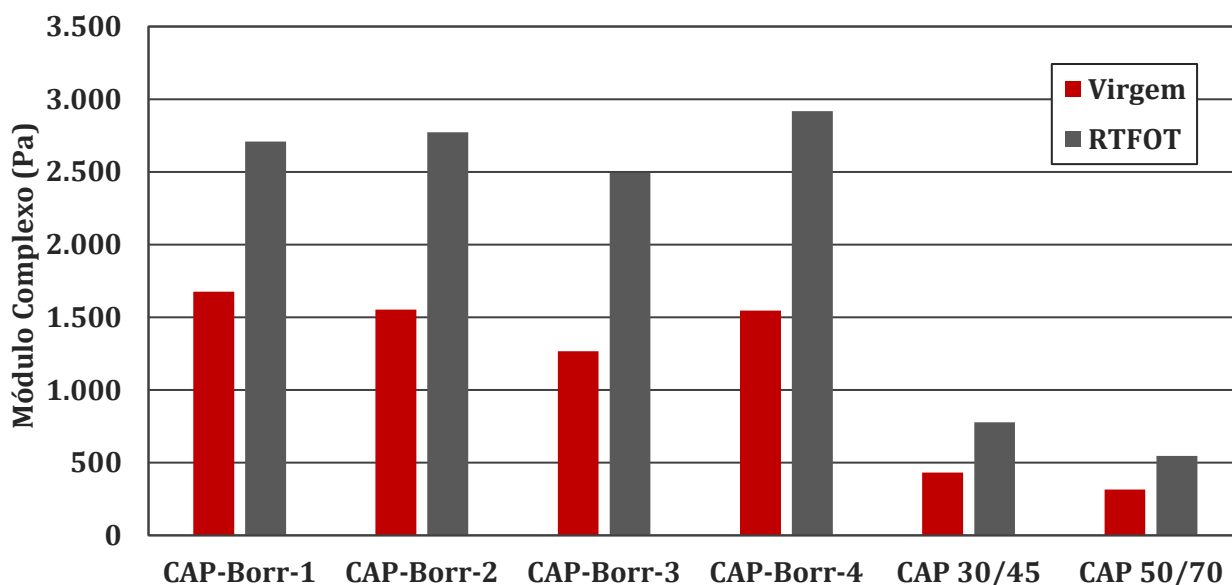


Figura 3.14: Módulo complexo dos materiais estudados na temperatura de 76°C

Na Tabela 3.16 e na Figura 3.15 pode-se notar que o ângulo de fase do asfalto borracha foi similar nas quatro amostras analisadas oscilando de 71 a 77° na condição virgem e de 66 a 68° nas amostras envelhecidas no RTFOT. Estes valores foram inferiores aos obtidos no CAP 30/45 e no CAP 50/70, indicando que o asfalto borracha tem um comportamento mais elástico, quando comparado com ligantes asfálticos não modificados, de acordo também com a bibliografia consultada.

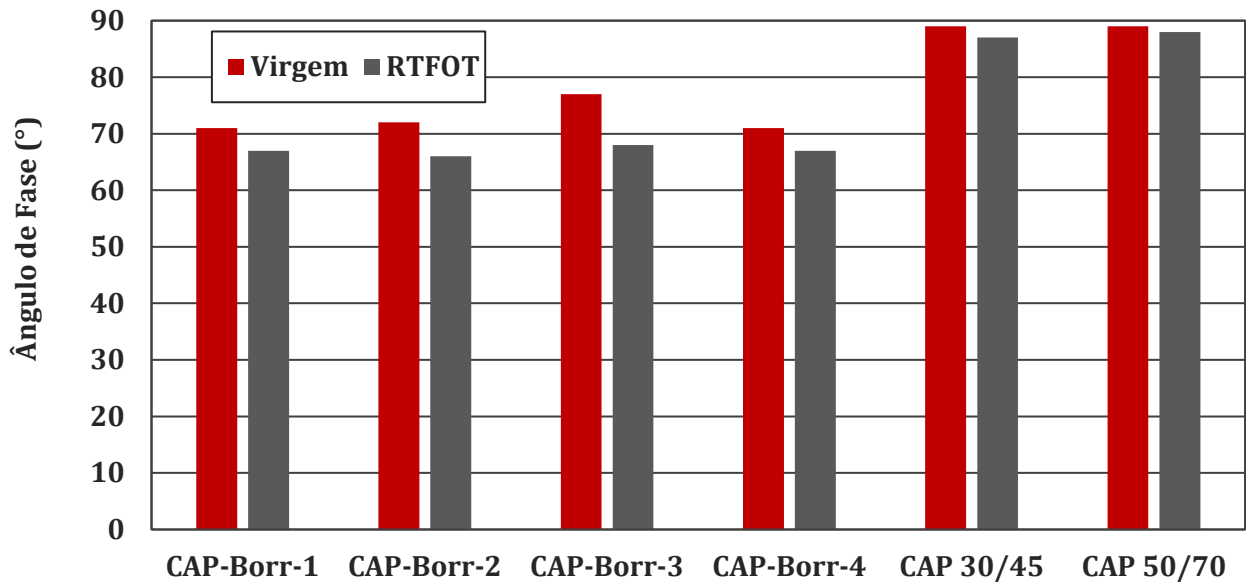


Figura 3.15: Ângulo de fase dos materiais estudados na temperatura de 76°C

3.2.3. Ensaio MSCR

O ensaio de MSCR, do inglês *Multiple Stress Creep Recovery*, foi executado de acordo com a AASHTO T350-14 para determinação das propriedades reológicas de recuperação elástica e compilância não recuperável. Essas propriedades são consideradas bastante efetivas para avaliar as peculiaridades do comportamento reológico de ligantes asfálticos modificados (DOMINGOS, 2011).

Neste ensaio emprega-se também o DSR com geometria de placas paralelas de 25mm de diâmetro, com distância entre placas de 1mm, na temperatura determinada pelo grau de desempenho do pavimento. Aplicam-se dois níveis de carregamento, de 0,1kPa nos 20 primeiros ciclos e de 3,2kPa nos 10 ciclos finais. Em cada ciclo, o carregamento é aplicado de forma constante durante 1 segundo seguido de repouso sob tensão nula durante 9 segundos, com o registro de:

- Início do período de fluência em cada ciclo (ϵ_0), no tempo de 0 segundo;
- Final do período de fluência de cada ciclo (ϵ_c), no tempo de 1 segundo;
- Final do período de recuperação de cada ciclo (ϵ_r), no tempo de 10 segundos.

A Figura 3.16 apresenta um ciclo completo de aplicação da tensão e repouso. Os dados obtidos no ensaio são utilizados para o cálculo da compilância não-recuperável (J_{nr}) e o percentual de recuperação (%R). A compilância não-recuperável (J_{nr}) é obtida pela relação entre a deformação não-recuperável e a tensão aplicada, assim, as deformações do material são normalizadas pelo valor

da tensão, como apresenta a Equação 3.1. O percentual de recuperação (%R) é obtido pela razão entre a deformação recuperável e a deformação total, expressado em porcentagem (Equação 3.2).

$$\%R(\tau, N) = \frac{[(\varepsilon_c - \varepsilon_0) - (\varepsilon_r - \varepsilon_0)] \times 100}{(\varepsilon_c - \varepsilon_0)} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$J_{nr}(\tau, N) = \frac{(\varepsilon_r - \varepsilon_c)}{\tau} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde: %R (σ, N) = percentual de recuperação

$J_{nr}(\tau, N)$ = compilância não-recuperável na tensão cisalhante τ (para $\tau=0,1\text{kPa}$ ou $3,2\text{kPa}$)

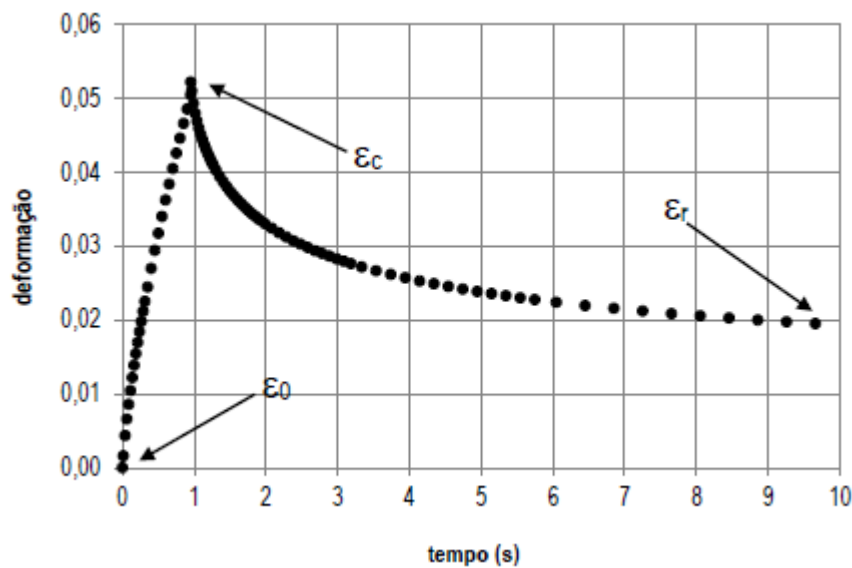


Figura 3.16: Deformações em um ciclo de fluência e recuperação no ensaio de MSCR

Neste estudo o ensaio de MSCR foi realizado nas temperaturas de 58°C, 64°C, 70°C a 76°C, já que a Rodovia Presidente Dutra está sendo estudada para determinação do grau de desempenho em trechos homogêneos. Assim, é mais conveniente obter os resultados de J_{nr} e %R em uma varredura de temperaturas para posterior avaliação. Os resultados desses ensaios, realizados nos ligantes asfálticos selecionados são apresentados nas Tabelas 3.17 a 3.22.

Tabela 3.17: Resultados do ensaio de MSCR em diversas temperaturas, em amostra virgem e envelhecida no RTFOT do CAP-Borr-1

| Temperatura (°C) | Tensão (Pa) | Amostra Virgem | | | Amostra Envelhecida RTFOT | | |
|---------------------|----------------|----------------|--------------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|---------------|
| | | R (%) | Jnr (kPa ⁻¹) | Jnr, diff (%) | R (%) | Jnr (kPa ⁻¹) | Jnr, diff (%) |
| 58 | 100 | 72,5 | 0,20 | 183 | 74,1 | 0,09 | 102 |
| 58 | 3.200 | 32,8 | 0,56 | | 50,5 | 0,18 | |
| 64 | 100 | 67,8 | 0,44 | 220 | 67,4 | 0,22 | 134 |
| 64 | 3.200 | 15,6 | 1,39 | | 28,9 | 0,51 | |
| 70 | 100 | 58,2 | 0,99 | 198 | 57,7 | 0,55 | 134 |
| 70 | 3.200 | 7,4 | 2,94 | | 17,0 | 1,29 | |
| 76 | 100 | 49,1 | 1,96 | 198 | 48,7 | 1,20 | 141 |
| 76 | 3.200 | 0,9 | 5,84 | | 6,4 | 2,89 | |

Tabela 3.18: Resultados do ensaio de MSCR em diversas temperaturas, em amostra virgem e envelhecida no RTFOT do CAP-Borr-2

| Temperatura (°C) | Tensão (Pa) | Amostra Virgem | | | Amostra Envelhecida RTFOT | | |
|---------------------|----------------|----------------|--------------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|---------------|
| | | R (%) | Jnr (kPa ⁻¹) | Jnr, diff (%) | R (%) | Jnr (kPa ⁻¹) | Jnr, diff (%) |
| 58 | 100 | 71,8 | 0,18 | 187 | 73,6 | 0,11 | 114 |
| 58 | 3.200 | 31,2 | 0,51 | | 47,8 | 0,24 | |
| 64 | 100 | 61,2 | 0,48 | 170 | 64,8 | 0,28 | 118 |
| 64 | 3.200 | 13,6 | 1,30 | | 27,2 | 0,61 | |
| 70 | 100 | 50,9 | 1,12 | 162 | 55,9 | 0,66 | 134 |
| 70 | 3.200 | 5,3 | 2,93 | | 15,0 | 1,54 | |
| 76 | 100 | 37,7 | 2,63 | 139 | 47,0 | 1,41 | 135 |
| 76 | 3.200 | 0,0 | 6,28 | | 5,4 | 3,32 | |

Tabela 3.19: Resultados do ensaio de MSCR em diversas temperaturas, em amostra virgem e envelhecida no RTFOT do CAP-Borr-3

| Temperatura (°C) | Tensão (Pa) | Amostra Virgem | | | Amostra Envelhecida RTFOT | | |
|---------------------|----------------|----------------|--------------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|---------------|
| | | R (%) | Jnr (kPa ⁻¹) | Jnr, diff (%) | R (%) | Jnr (kPa ⁻¹) | Jnr, diff (%) |
| 58 | 100 | 52,9 | 0,41 | 95 | 65,5 | 0,14 | 66 |
| 58 | 3.200 | 17,5 | 0,80 | | 45,9 | 0,23 | |
| 64 | 100 | 59,8 | 0,60 | 218 | 64,9 | 0,27 | 135 |
| 64 | 3.200 | 6,1 | 1,91 | | 24,0 | 0,63 | |
| 70 | 100 | 44,1 | 1,55 | 168 | 56,8 | 0,61 | 154 |
| 70 | 3.200 | 0,2 | 4,16 | | 12,8 | 1,56 | |
| 76 | 100 | 33,2 | 3,31 | 149 | 47,2 | 1,37 | 152 |
| 76 | 3.200 | 0,0 | 8,25 | | 3,9 | 3,46 | |

Tabela 3.20: Resultados do ensaio de MSCR em diversas temperaturas, em amostra virgem e envelhecida no RTFOT do CAP-Borr-4

| Temperatura (°C) | Tensão (Pa) | Amostra Virgem | | | Amostra Envelhecida RTFOT | | |
|---------------------|----------------|----------------|--------------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|---------------|
| | | R (%) | Jnr (kPa ⁻¹) | Jnr, diff (%) | R (%) | Jnr (kPa ⁻¹) | Jnr, diff (%) |
| 58 | 100 | 64,2 | 0,23 | 112 | 67,6 | 0,11 | 50 |
| 58 | 3.200 | 31,8 | 0,49 | | 53,5 | 0,17 | |
| 64 | 100 | 55,7 | 0,54 | 127 | 64,9 | 0,23 | 96 |
| 64 | 3.200 | 14,3 | 1,22 | | 33,1 | 0,45 | |
| 70 | 100 | 45,1 | 1,22 | 124 | 57,7 | 0,51 | 115 |
| 70 | 3.200 | 5,9 | 2,74 | | 21,8 | 1,10 | |
| 76 | 100 | 36,0 | 2,62 | 132 | 49,9 | 1,11 | 129 |
| 76 | 3.200 | 0,0 | 6,08 | | 9,3 | 2,55 | |

Tabela 3.21: Resultados do ensaio de MSCR em diversas temperaturas, em amostra virgem e envelhecida no RTFOT do CAP 30/45

| Temperatura (°C) | Tensão (Pa) | Amostra Virgem | | | Amostra Envelhecida RTFOT | | |
|------------------|-------------|----------------|--------------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|---------------|
| | | R (%) | Jnr (kPa ⁻¹) | Jnr, diff (%) | R (%) | Jnr (kPa ⁻¹) | Jnr, diff (%) |
| 58 | 100 | 0,0 | 1,72 | 6 | 4,0 | 0,67 | 4 |
| 58 | 3.200 | 0,0 | 1,82 | | 1,2 | 0,70 | |
| 64 | 100 | 0,0 | 4,29 | | 0,2 | 1,73 | |
| 64 | 3.200 | 0,2 | 4,56 | 6 | 0,7 | 1,87 | 8 |
| 70 | 100 | 0,0 | 9,94 | | 0,0 | 4,20 | |
| 70 | 3.200 | 0,0 | 10,51 | 6 | 0,0 | 4,55 | 8 |
| 76 | 100 | 0,0 | 21,15 | | 0,0 | 9,61 | |
| 76 | 3.200 | 0,0 | 22,24 | 5 | 0,0 | 10,35 | 8 |

Tabela 3.22: Resultados do ensaio de MSCR em diversas temperaturas, em amostra virgem e envelhecida no RTFOT do CAP 50/70

| Temperatura (°C) | Tensão (Pa) | Amostra Virgem | | | Amostra Envelhecida RTFOT | | |
|------------------|-------------|----------------|--------------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|---------------|
| | | R (%) | Jnr (kPa ⁻¹) | Jnr, diff (%) | R (%) | Jnr (kPa ⁻¹) | Jnr, diff (%) |
| 58 | 100 | 0,0 | 2,53 | 6 | 0,0 | 2,97 | 6 |
| 58 | 3.200 | 0,0 | 2,70 | | 0,0 | 3,15 | |
| 64 | 100 | 0,0 | 6,08 | | 0,0 | 7,11 | |
| 64 | 3.200 | 0,2 | 6,65 | 9 | 0,1 | 7,52 | 6 |
| 70 | 100 | 0,0 | 14,15 | | 0,0 | 15,52 | |
| 70 | 3.200 | 0,0 | 15,04 | 6 | 0,0 | 16,40 | 6 |
| 76 | 100 | 0,0 | 29,66 | | 0,0 | 31,82 | |
| 76 | 3.200 | 0,0 | 31,17 | 5 | 0,0 | 33,64 | 6 |

A Tabela 3.23 apresenta um resumo dos resultados do ensaio de MSCR executado na temperatura de 76°C, dos ligantes asfálticos avaliados na condição virgem e envelhecidos após RTFOT. Nota-se que os valores de Jnr são muito inferiores nos ligantes asfálticos modificados por borracha, quando comparados com os convencionais CAP 30/45 e CAP 50/70. Esse comportamento indica a superioridade dos ligantes asfálticos modificados por borracha para resistir à deformação permanente, já que valores baixos de Jnr são associados a resistir maiores solicitações do tráfego.

Tabela 3.23: Resumo dos resultados do ensaio de MSCR executado a 76°C, nas amostras virgens e envelhecidas no RTFOT

| Amostra | Tensão (Pa) | Amostra Virgem | | Amostra Envelhecida RTFOT | |
|------------|-------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------|
| | | R (%) | Jnr (kPa-1) | R (%) | Jnr (kPa-1) |
| CAP-Borr 1 | 100 | 49,1 | 1,961 | 48,7 | 1,198 |
| CAP-Borr 1 | 3.200 | 0,9 | 5,842 | 6,4 | 2,891 |
| CAP-Borr 2 | 100 | 37,7 | 2,632 | 47,0 | 1,409 |
| CAP-Borr 2 | 3.200 | 0,0 | 6,282 | 5,4 | 3,317 |
| CAP-Borr 3 | 100 | 33,2 | 3,311 | 47,2 | 1,370 |
| CAP-Borr 3 | 3.200 | 0,0 | 8,252 | 3,9 | 3,460 |
| CAP-Borr 4 | 100 | 36,0 | 2,617 | 49,9 | 1,114 |
| CAP-Borr 4 | 3.200 | 0,0 | 6,081 | 9,3 | 2,552 |
| CAP 30/45 | 100 | 0,0 | 21,147 | 0,0 | 9,614 |
| CAP 30/45 | 3.200 | 0,0 | 22,239 | 0,0 | 10,348 |
| CAP 50/70 | 100 | 0,0 | 29,658 | 0,0 | 31,822 |
| CAP 50/70 | 3.200 | 0,0 | 31,167 | 0,0 | 33,644 |

A Figura 3.17 apresenta o percentual de recuperação (%R) dos ligantes asfálticos virgens e envelhecidos no RTFOT, nas tensões de 100Pa e 3.200Pa. Nota-se que na tensão inferior, os ligantes asfálticos apresentam valores de %R superiores, em torno de 30 a 50%, e quando a tensão aplicada é de 3.200Pa, o percentual de recuperação elástico é inferior a 10%, indicando influência do carregamento no comportamento elástico dos ligantes asfálticos. Com relação ao efeito de envelhecimento no RTFOT, nota-se as amostras virgens apresentam menor percentual de recuperação elástico.

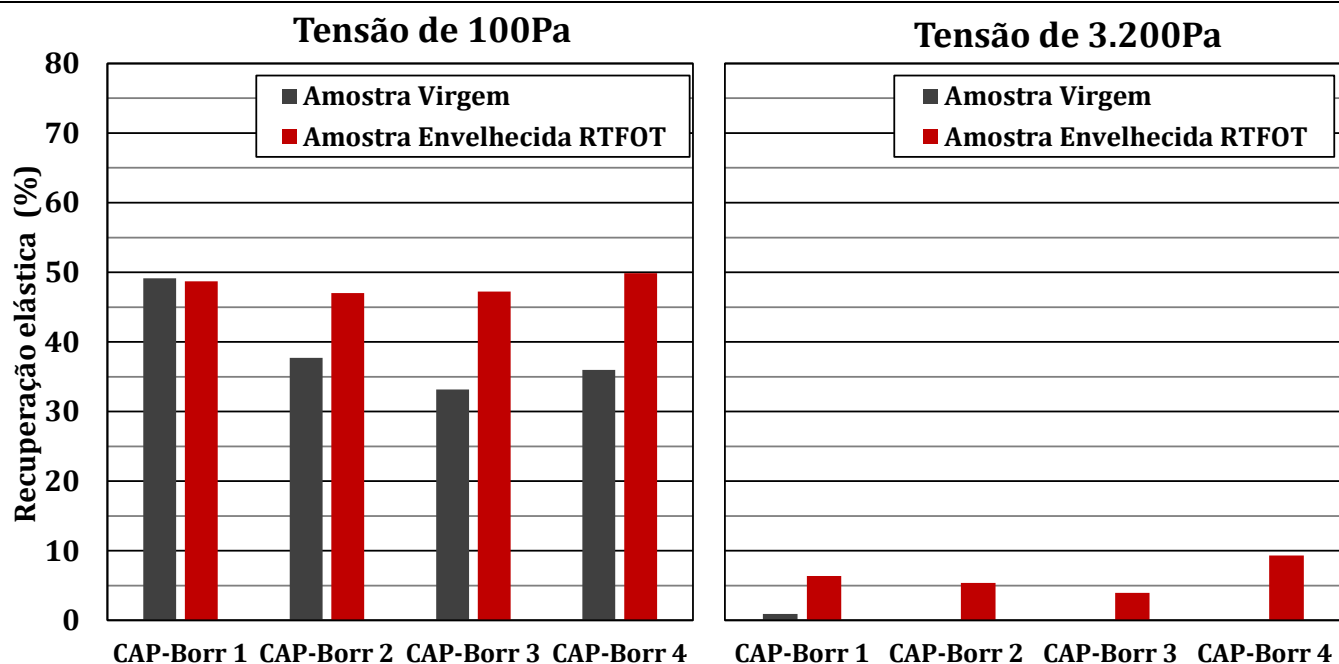


Figura 3.17: Recuperação elástica determinada no ensaio de MSCR na temperatura de 76°C, em amostras virgens e envelhecidas no RTFOT

Os valores do parâmetro J_{nr} são inferiores em níveis de tensão baixos, como apresenta a Figura 3.18. Já o efeito de envelhecimento no RFTOT produziu uma redução nos valores desse parâmetro, devido a que o envelhecimento enrijece os ligantes asfálticos. No nível de tensão de 3.200kPa, o valor de J_{nr} inferior a 4,0 indica que o asfalto é apropriado para resistir tráfego padrão de N de até 10^7 , na temperatura de 76°C, e para temperaturas do pavimento inferiores poderia resistir a tráfegos mais elevados. Nota-se que os quatro ligantes asfálticos modificados por borracha avaliados neste estudo apresentam comportamento muito parecido.

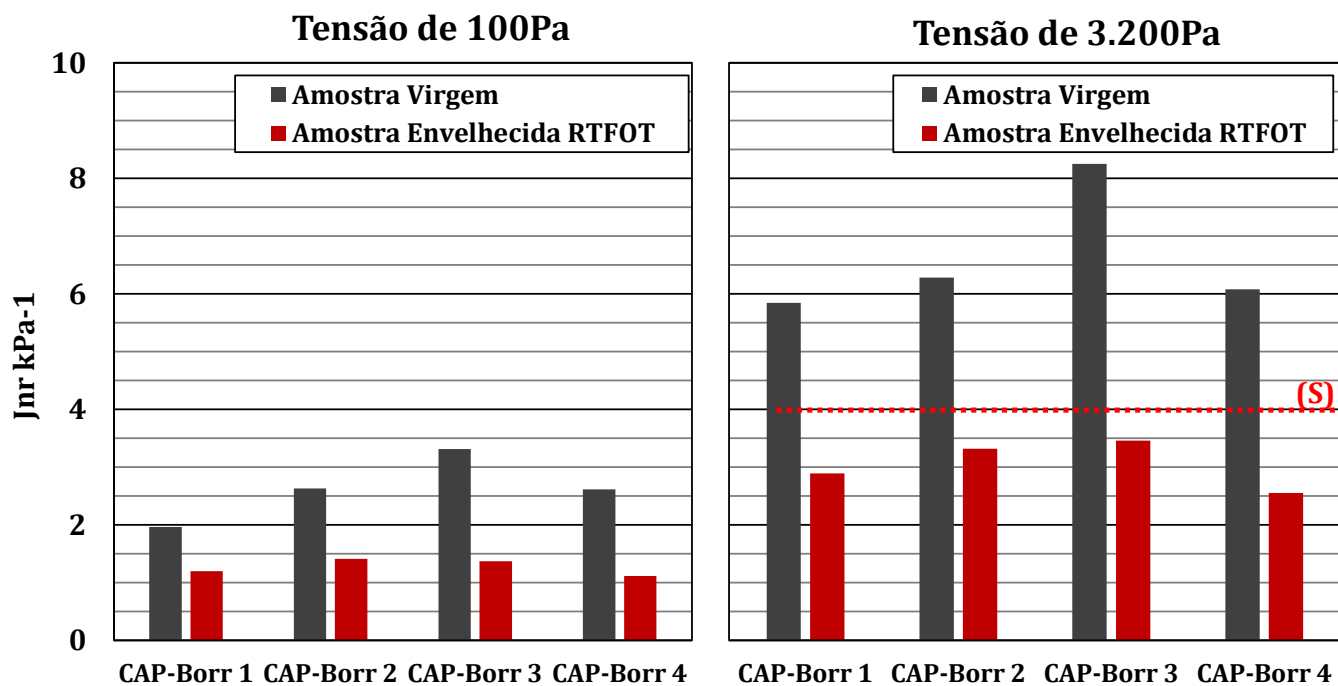


Figura 3.18: Parâmetro “Jnr” determinado no ensaio de MSCR na temperatura de 76°C, em amostras virgens e envelhecidas no RTFOT

3.2.4. Curva Mestre

A curva mestre é uma forma de representar o comportamento reológico dos materiais, em função da frequência de carregamento para uma única temperatura, chamada de temperatura de referência, para um espectro de frequências ou tempos de carregamento.

Os materiais termorreologicamente simples permitem que os efeitos de tempo e temperatura possam ser intercambiados, isto é, um determinado aumento na temperatura é equivalente a uma determinada redução na frequência de carregamento. Na análise de uma curva mestre, o efeito de uma temperatura baixa é equivalente ao da frequência alta e, de forma análoga, o efeito da temperatura alta é equivalente ao da frequência baixa.

Neste estudo, as curvas mestre foram construídas para os materiais estudados na condição virgem, envelhecidos no RTFOT (curto prazo) e envelhecidos no PAV (longo prazo). Nas Figuras 3.19 a 3.24 apresentam-se as curvas mestres do CAP-Borr-1, CAP-Borr-2, CAP-Borr-3, CAP 30/45 e CAP 50/70, respectivamente.

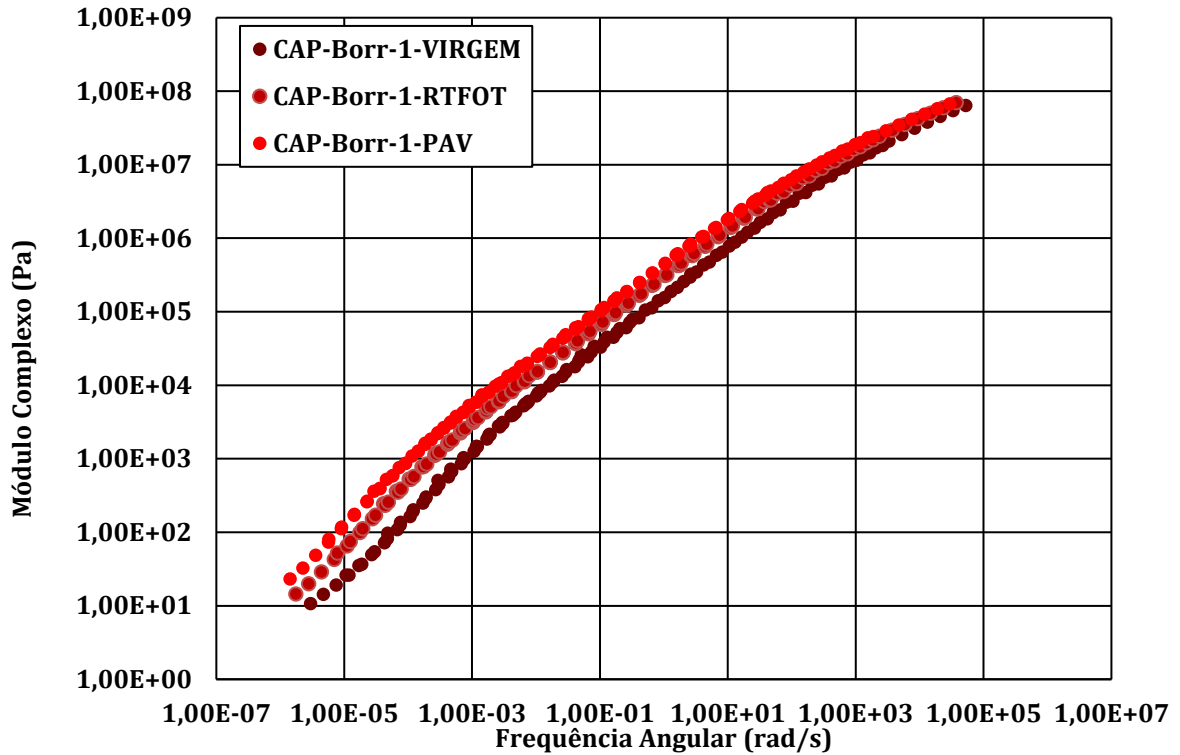


Figura 3.19: Curva mestre da amostra CAP-Borr-1 na condição virgem, envelhecida no RTFOT e no PAV

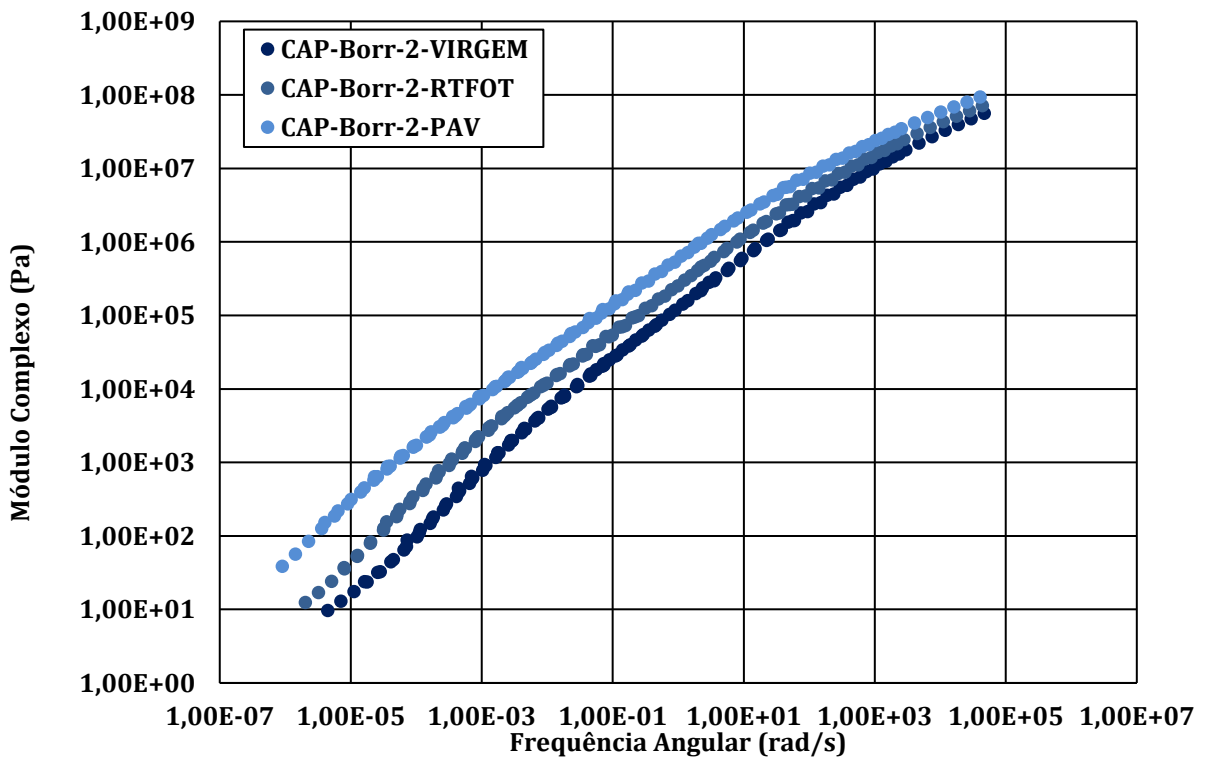


Figura 3.20: Curva mestre da amostra CAP-Borr-2 na condição virgem, envelhecida no RTFOT e no PAV

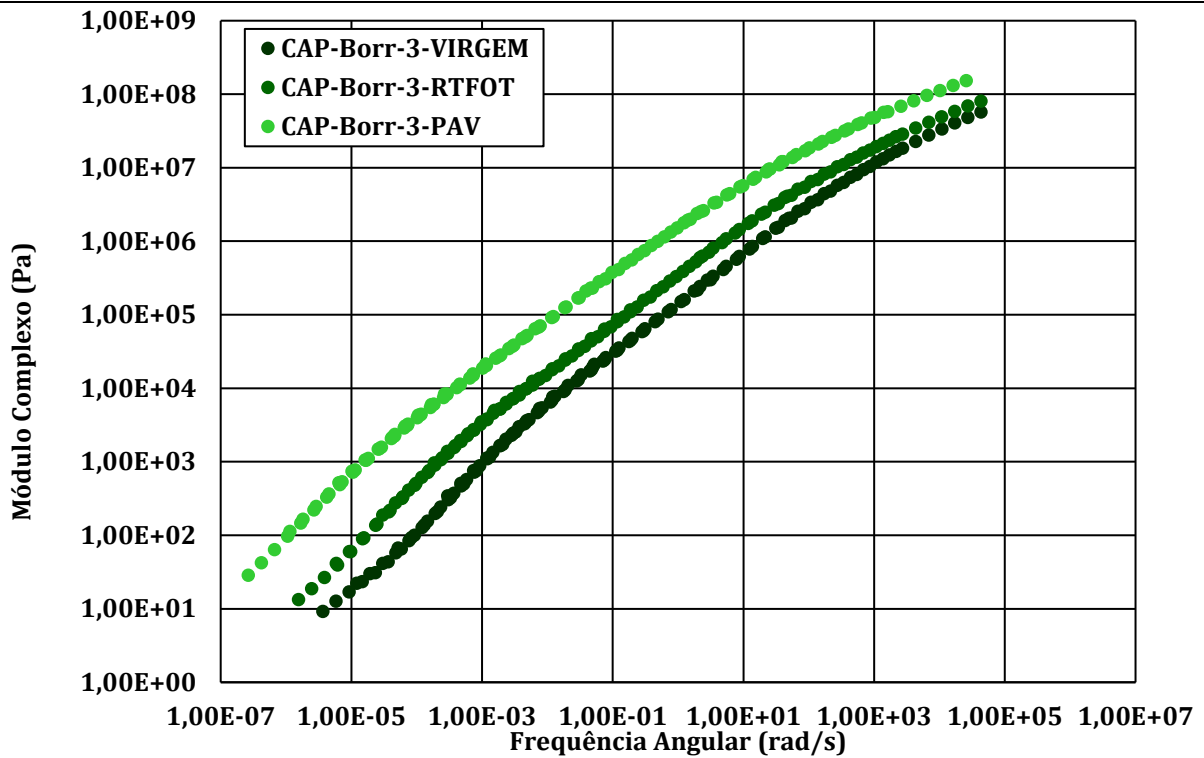


Figura 3.21: Curva mestre da amostra CAP-Borr-3 na condição virgem, envelhecida no RTFOT e no PAV

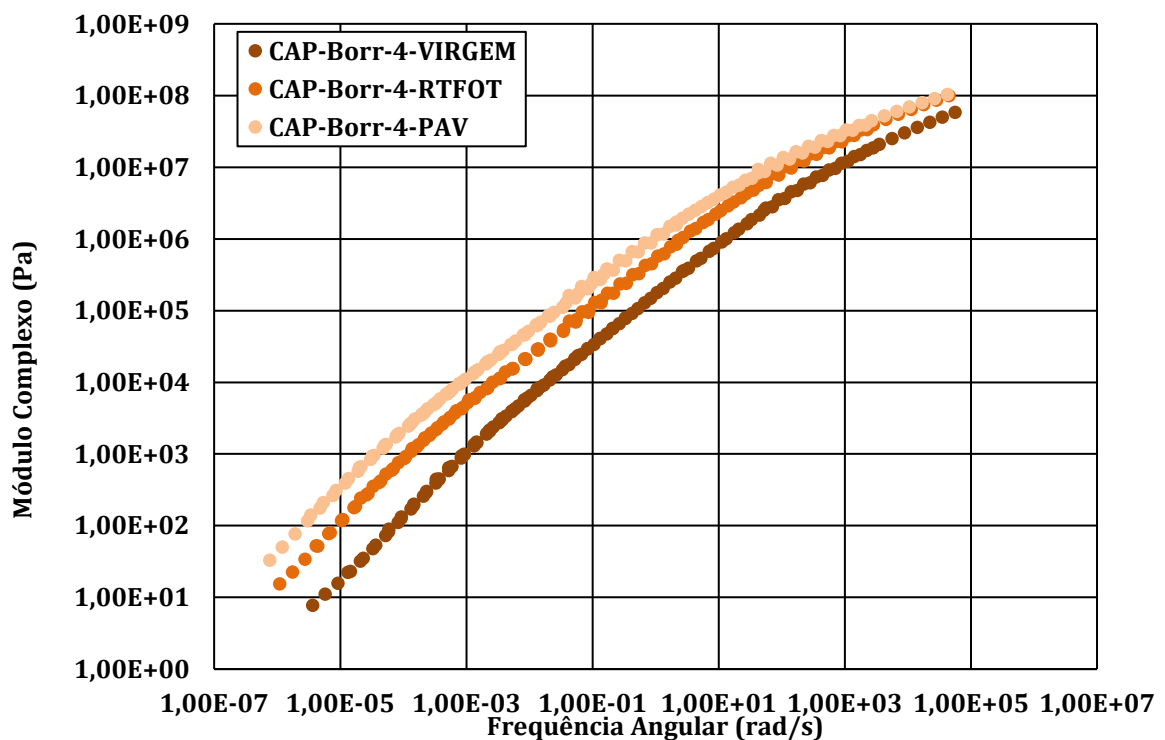


Figura 3.22: Curva mestre da amostra CAP-Borr-3 na condição virgem, envelhecida no RTFOT e no PAV

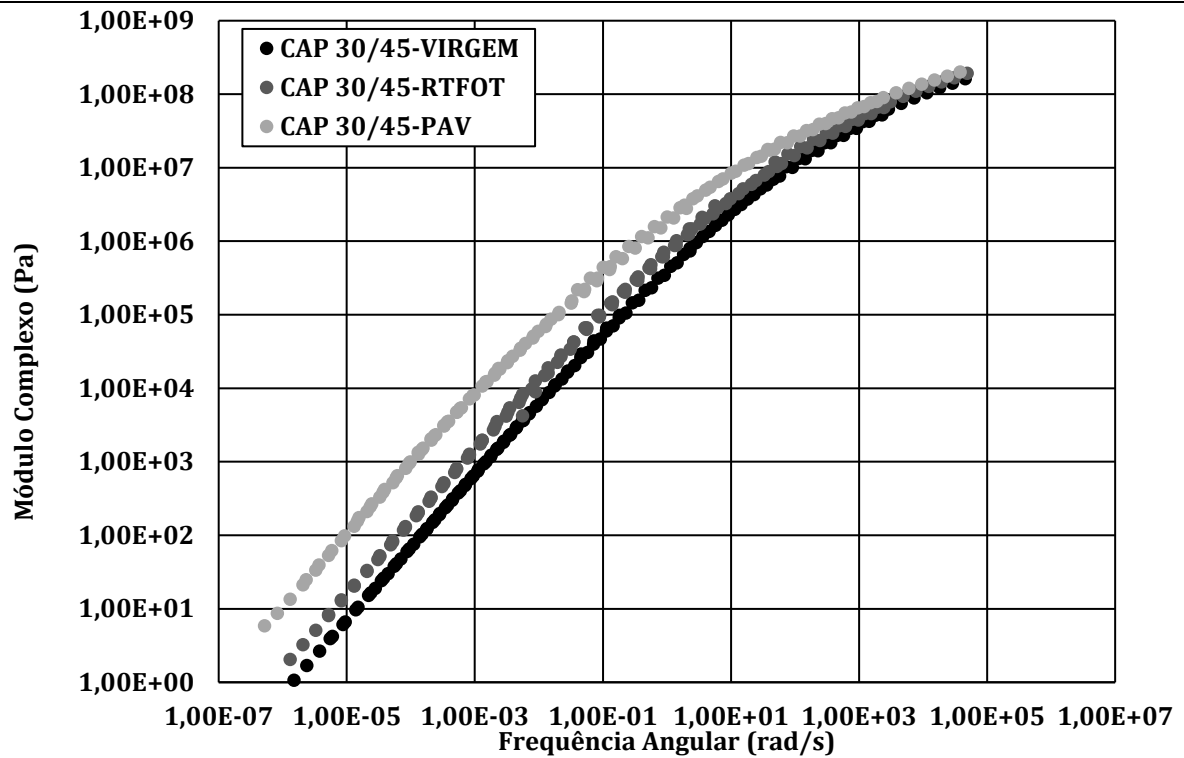


Figura 3.23: Curva mestre da amostra CAP 30/45 na condição virgem, envelhecida no RTFOT e no PAV

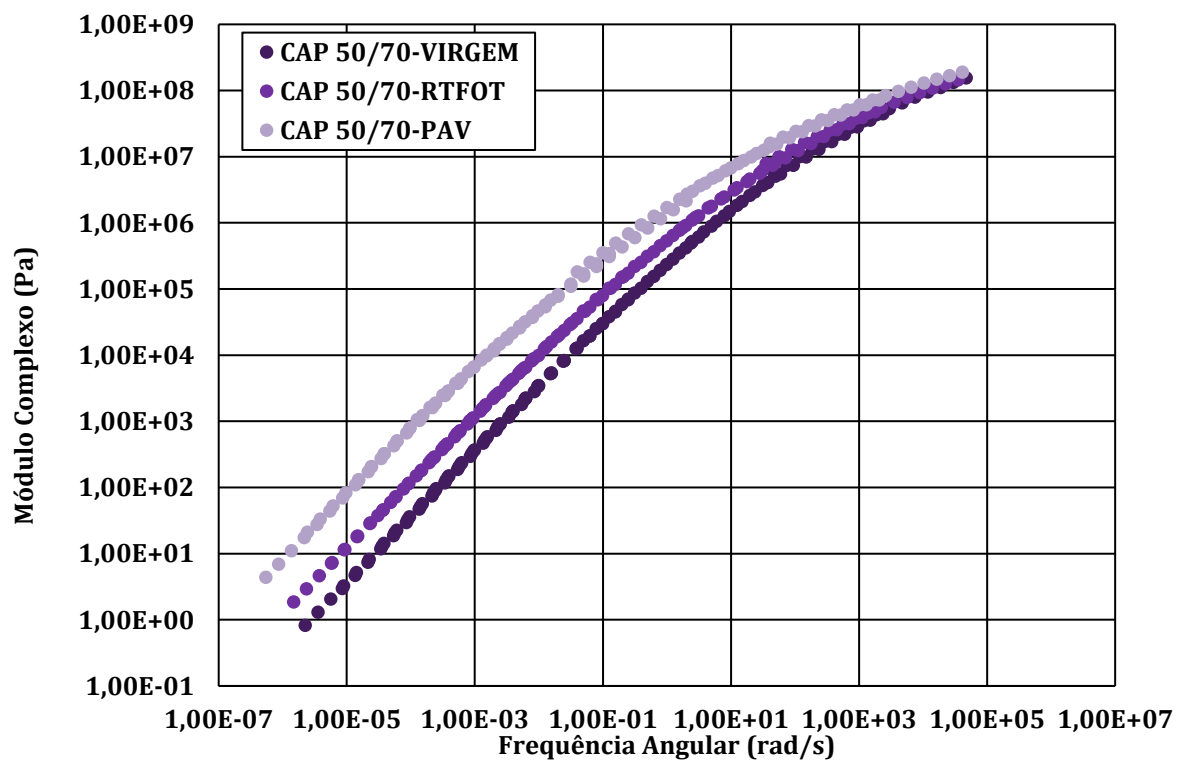


Figura 3.24: Curva mestre da amostra CAP 50/70 na condição virgem, envelhecida no RTFOT e no PAV

Na Figura 3.25 apresentam-se as curvas mestre dos ligantes asfálticos estudados na condição virgem. Nota-se que para elevada frequência, equivalente a baixa temperatura, os ligantes asfálticos convencionais (CAP 30/45 e CAP 50/70) apresentam maiores valores de módulo complexo (G^*), ou rigidez, quando comparados com as curvas dos ligantes asfálticos modificados por borracha. Esse comportamento pode indicar maior susceptibilidade ao trincamento térmico em pavimentos sujeitos a temperaturas mais baixas e construídos com os ligantes asfálticos convencionais.

Em baixas frequências, ou elevadas temperaturas, observa-se na Figura 3.21 que os ligantes asfálticos convencionais apresentam menores valores de módulo complexo (G^*), ou rigidez, quando comparados com as curvas dos ligantes asfálticos modificados por borracha. Pode-se afirmar, portanto, que os ligantes asfálticos modificados por borracha apresentam maior resistência à deformar em temperaturas elevadas, podendo contribuir em misturas asfálticas para resistir o desenvolvimento de defeitos do tipo de afundamento de trilha de roda (ATR).

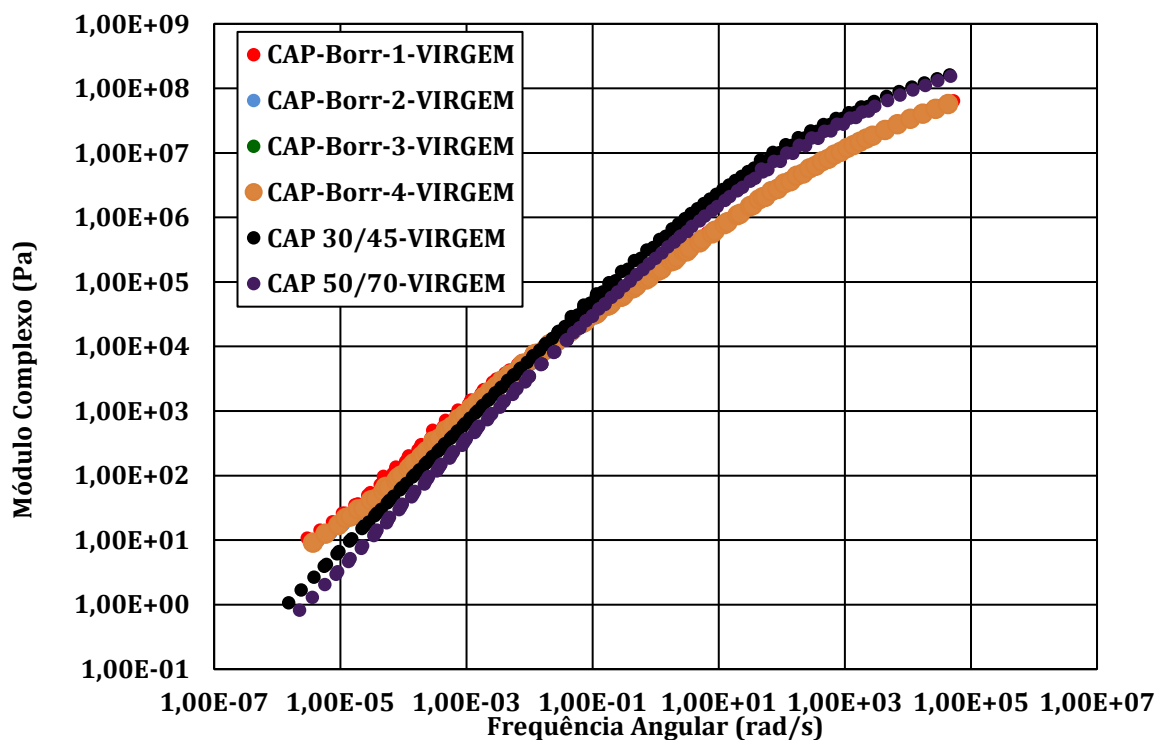


Figura 3.25: Curva mestre das amostras virgens

Na Figura 3.26 apresenta-se também as curvas mestres dos materiais, mas envelhecidos a curto prazo no RTFOT. O envelhecimento a curto prazo simula as condições às quais o ligante asfáltico é submetido durante a usinagem da mistura asfáltica e seu transporte até a obra, portanto, ajuda a determinar as propriedades dos asfaltos a partir do momento no qual eles entrarão em serviço. Observa-se na Figura 3.26 um comportamento muito parecido ao notado nas amostras virgens.

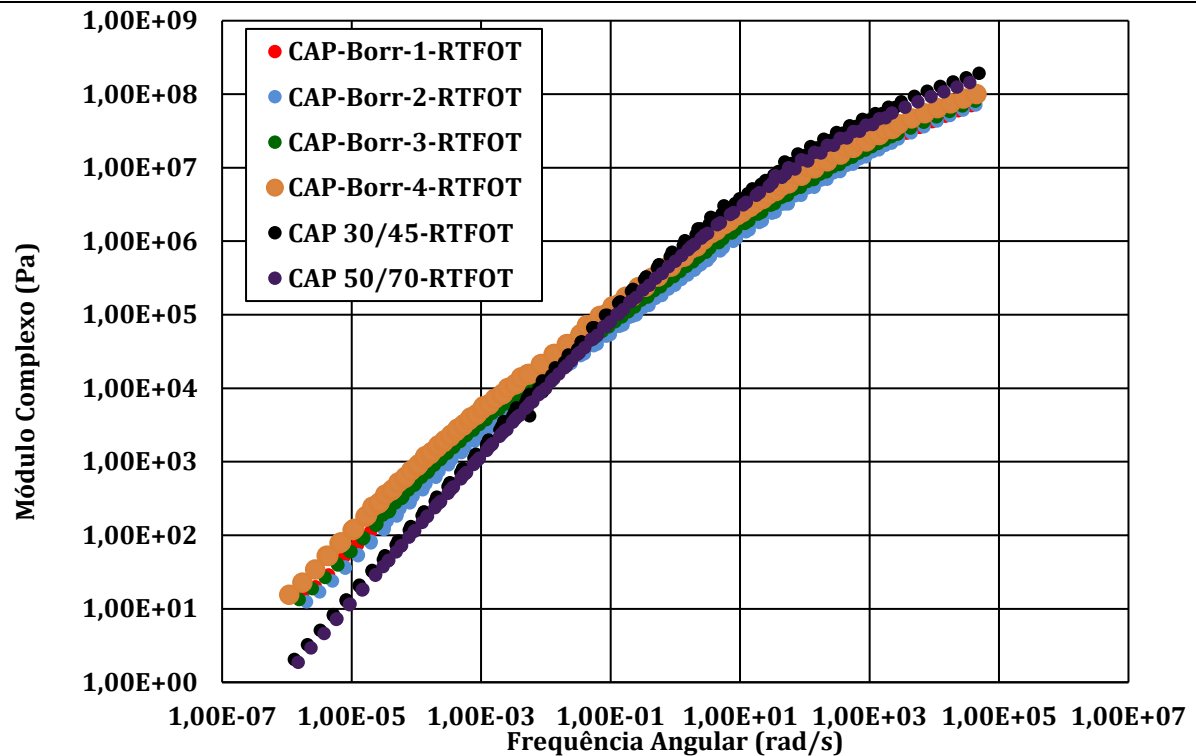


Figura 3.26: Curva mestre das amostras envelhecidas no RTFOT

O envelhecimento a longo prazo no PAV também foi realizado nas amostras de ligantes asfálticos estudados. Neste estudo as amostras foram envelhecidas na temperatura de 100°C, pressão de 2,1MPa durante 20 horas. Para a construção das curvas mestres na condição PAV, as amostras são submetidas de forma prévia ao envelhecimento de curto prazo no RTFOT e em seguida são envelhecidas no PAV. Nota-se na Figura 3.27 que os três ligantes asfálticos modificados por borracha apresentaram comportamento distinto e, vale lembrar que na caracterização convencional dos ligantes, todos apresentaram um comportamento muito parecido. O CAP-Borr-1, por exemplo, manteve baixa rigidez a elevada frequência, mas reduziu a rigidez em baixas frequências até níveis similares aos ligantes asfálticos convencionais.

As amostras do CAP-Borr-2, CAP-Borr-3 e CAP-Borr-4 apresentaram comportamento muito parecido na curva mestre PAV, como é observado na Figura 3.27. O módulo complexo (G^*) aumentou até níveis próximos aos dos ligantes convencionais a elevadas frequências mas, ao se reduzir a frequência, a rigidez do CAP-Borr-2, CAP-Borr-3 e CAP-Borr-4 mantiveram-se superiores aos CAP 30/45 e CAP 50/70.

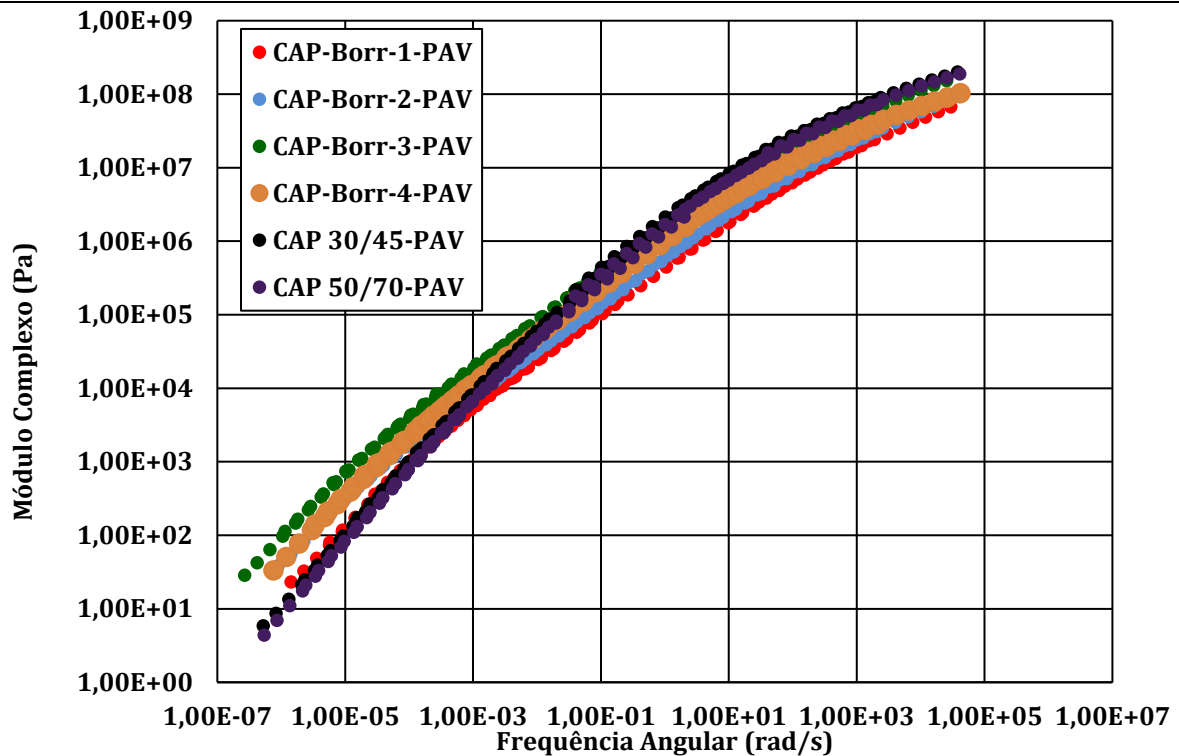


Figura 3.27: Curva mestre das amostras envelhecidas no PAV

3.2.5. Fadiga pelo parâmetro $G^* \sin(\delta)$

O parâmetro $G^* \sin \delta$ foi escolhido como critério de fadiga durante o programa SHRP em resposta à necessidade de um parâmetro simples e fácil de ser obtido (Faxina, 2006). Ensaios laboratoriais de pesquisas indicaram que esse parâmetro diferenciaria diferentes ligantes asfálticos com relação à resistência ao trincamento por fadiga.

Para prevenir os danos por fadiga em misturas asfálticas, foi limitado na norma ASTM D6373-99 o valor máximo de 5.000kPa para este parâmetro. Assim, determina-se a temperatura intermediária crítica na qual o ligante asfáltico avaliado, após envelhecimento no PAV, apresenta esse valor.

Na Tabela 3.24 são apresentados os resultados do parâmetro $G^* \sin(\delta)$ em distintas temperaturas, a partir das quais é obtida a temperatura crítica, também apresentada nessa tabela e na Figura 3.28. Observa-se que os ligantes asfálticos modificados por borracha apresentam temperaturas inferiores, quando comparadas com o CAP 30/45 e o CAP 50/70, indicando que, em temperaturas intermediárias, poderiam resistir melhor ao trincamento por fadiga.

Tabela 3.24: Resultados do parâmetro $G^*\text{sen}(\delta)$ para os distintos ligantes asfálticos

| Ligante Asfáltico | Temperatura (°C) | | | | Temp. Crítica |
|-------------------|------------------|-------|--------|--------|---------------|
| | 34 | 28 | 22 | 16 | |
| CAP-Borr-1 | 266 | 673 | 1.844 | 4.712 | 18 |
| CAP-Borr-2 | 542 | 1.434 | 3.671 | 8.511 | 21 |
| CAP-Borr-3 | 505 | 1.312 | 3.248 | 7.291 | 20 |
| CAP-Borr-4 | 419 | 1.248 | 3.449 | 8.283 | 21 |
| CAP 30/45 | 1.511 | 4.101 | 10.008 | 21.309 | 28 |
| CAP 50/70 | 1.129 | 3.053 | 7.315 | 11.456 | 25 |

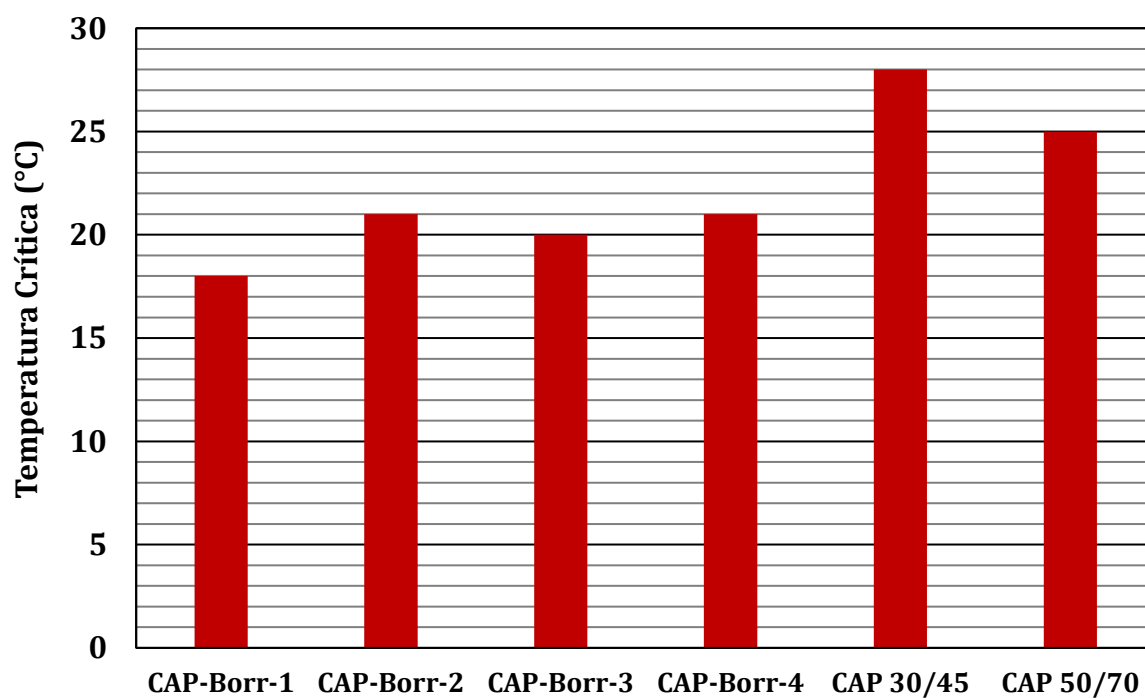


Figura 3.28: Temperatura crítica para desenvolvimento de fadiga dos distintos ligantes asfálticos

4. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS (ETAPA C E ETAPA E)

Um dos objetivos específicos desta pesquisa foi estudar em laboratório o comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligante asfáltico modificado por borracha e para isso, selecionaram-se o CAP-Borr-1 e o CAP-Borr-2, cujas características empíricas e reológicas foram descritas no capítulo anterior. Também foi selecionado o CAP 30/45 para ser empregado como parâmetro de referência nos resultados obtidos. Para execução desta atividade, foram selecionadas quatro granulometrias distintas para os três ligantes asfálticos, totalizando doze misturas asfálticas, como apresenta-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Identificação das misturas asfálticas avaliadas neste estudo

| ID Mistura | Ligante Asfáltico | Faixa Granulométrica |
|------------|-------------------|----------------------|
| k1 | Borr-1 | Faixa III-DERSA |
| k2 | Borr-1 | EGL 19mm |
| k3 | Borr-1 | EGL 9,5mm |
| k4 | Borr-1 | Gap Graded |
| k5 | Borr-2 | Faixa III-DERSA |
| k6 | Borr-2 | EGL 19mm |
| k7 | Borr-2 | EGL 9,5mm |
| k8 | Borr-2 | Gap Graded |
| k9 | CAP 30/45 | Faixa III-DERSA |
| k10 | CAP 30/45 | EGL 19mm |
| k11 | CAP 30/45 | EGL 9,5mm |
| k12 | CAP 30/45 | Gap Graded |

Inicialmente foram realizadas as dosagens das misturas asfálticas da Tabela 4.1 para, de posse dos parâmetros de dosagem, preparar os corpos de prova para cada um dos ensaios planejados no programa laboratorial de avaliação mecânica.

4.1. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para dosagem das misturas asfálticas empregaram-se agregados graníticos da pedreira Jambeiro, usualmente empregados em atividades de conservação da Rodovia Presidente Dutra no trecho de São Paulo. Esses agregados apresentam características mecânicas e de durabilidade adequadas para seu emprego em misturas asfálticas.

As composições granulométricas das quatro faixas estudadas são apresentadas nas Tabelas 4.2 a 4.5. Vale salientar que foi utilizado 1,5% de cal hidratada do tipo CH-1, como melhorador de adesividade das misturas asfálticas, que é prática corrente no Grupo CCR. Na Figura 4.1 apresenta-se um comparativo das granulometrias que serão utilizadas na composição das misturas asfálticas.

Tabela 4.2: Composição granulométrica da mistura asfáltica EGL 9,5mm

| Peneiras | | AGREGADO | | | Mistura Obtida | FAIXA EGL 9,5mm | |
|---------------------------------------|-------|-------------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------|
| # | mm | Pedrisco | Pó de Pedra | Cal Hidratada | | Mínimo | Máximo |
| 1" | 25,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100 | 100 |
| 3/4" | 19,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100 | 100 |
| 1/2" | 12,5 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100 | 100 |
| 3/8" | 9,5 | 98,8 | 100,0 | 100,0 | 99,3 | 90 | 100 |
| Nº 4 | 4,75 | 17,7 | 95,6 | 100,0 | 52,0 | 40 | 65 |
| Nº 10 | 2,00 | 6,5 | 67,4 | 100,0 | 33,8 | 25 | 45 |
| Nº 40 | 0,42 | 3,6 | 35,1 | 98,0 | 18,4 | 13 | 24 |
| Nº 80 | 0,18 | 2,8 | 21,4 | 98,0 | 12,1 | 8 | 17 |
| Nº 200 | 0,075 | 1,8 | 11,0 | 90,0 | 7,0 | 4 | 10 |
| Composição da Mistura Seca | | 56,0 | 42,5 | 1,5 | 100,0 | | |

Tabela 4.3: Composição granulométrica da mistura asfáltica Faixa III-DERSA

| Peneiras | | AGREGADO | | | | Mistura Obtida | FAIXA III-DERSA | |
|---------------------------------------|-------|-------------|-------------|----------------|------------------|-------------------|-----------------|--------|
| # | mm | Brita 1 | Pedrisco | Pó de Pedra | Cal Hidratada | | Mínimo | Máximo |
| 1" | 25,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100 | 100 |
| 3/4" | 19,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100 | 100 |
| 1/2" | 12,5 | 49,5 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 88,4 | 80 | 100 |
| 3/8" | 9,5 | 17,9 | 98,8 | 100,0 | 100,0 | 80,8 | 70 | 90 |
| Nº 4 | 4,75 | 2,7 | 17,7 | 95,6 | 100,0 | 54,8 | 50 | 70 |
| Nº 10 | 2,00 | 2,0 | 6,5 | 67,4 | 100,0 | 37,6 | 33 | 48 |
| Nº 40 | 0,42 | 1,7 | 3,6 | 35,1 | 98,0 | 20,5 | 15 | 25 |
| Nº 80 | 0,18 | 1,3 | 2,8 | 21,4 | 98,0 | 13,3 | 8 | 17 |
| Nº 200 | 0,075 | 0,9 | 1,8 | 11,0 | 90,0 | 7,6 | 4 | 10 |
| Composição da Mistura Seca | | 23,0 | 25,0 | 50,5 | 1,5 | 100,0 | | |

Tabela 4.4: Composição granulométrica da mistura asfáltica Faixa EGL 19mm

| Peneiras | | AGREGADO | | | | Mistura Obtida | FAIXA EGL 19mm | |
|---------------------------------------|-------|-------------|-------------|----------------|------------------|-------------------|----------------|--------|
| # | mm | Brita 1 | Pedrisco | Pó de Pedra | Cal Hidratada | | Mínimo | Máximo |
| 1" | 25,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100 | 100 |
| 3/4" | 19,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 90 | 100 |
| 1/2" | 12,5 | 49,5 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 82,3 | 70 | 90 |
| 3/8" | 9,5 | 17,9 | 98,8 | 100,0 | 100,0 | 70,9 | 60 | 80 |
| Nº 4 | 4,75 | 2,7 | 17,7 | 95,6 | 100,0 | 37,5 | 30 | 50 |
| Nº 10 | 2,00 | 2,0 | 6,5 | 67,4 | 100,0 | 24,9 | 20 | 35 |
| Nº 40 | 0,42 | 1,7 | 3,6 | 35,1 | 98,0 | 14,0 | 10 | 20 |
| Nº 80 | 0,18 | 1,3 | 2,8 | 21,4 | 98,0 | 9,4 | 5 | 15 |
| Nº 200 | 0,075 | 0,9 | 1,8 | 11,0 | 90,0 | 5,6 | 2 | 10 |
| Composição da Mistura Seca | | 35,0 | 33,0 | 30,5 | 1,5 | 100,0 | | |

Tabela 4.5: Composição granulométrica da mistura asfáltica Faixa Gap Graded

| Peneiras | | AGREGADO | | | Mistura Obtida | FAIXA Gap Graded | |
|---------------------------------------|-------|-------------|----------------|------------------|-------------------|------------------|--------|
| # | mm | Pedrisco | Pó de Pedra | Cal Hidratada | | Mínimo | Máximo |
| 1/2" | 12,7 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100 | 100 |
| 3/8" | 9,5 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 80 | 100 |
| Nº 4 | 4,76 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 34,0 | 25 | 40 |
| Nº 8 | 2,60 | 98,8 | 100,0 | 100,0 | 24,5 | 19 | 32 |
| Nº 16 | 1,18 | 17,7 | 95,6 | 100,0 | 19,8 | 16 | 22 |
| Nº 30 | 0,60 | 6,5 | 67,4 | 100,0 | 16,6 | 10 | 18 |
| Nº 50 | 0,30 | 3,6 | 35,1 | 98,0 | 12,5 | 8 | 13 |
| Nº 100 | 0,15 | 2,8 | 21,4 | 98,0 | 9,1 | 6 | 10 |
| Nº 200 | 0,074 | 1,8 | 11,0 | 90,0 | 6,2 | 4 | 7 |
| Composição da Mistura Seca | | 73,0 | 25,5 | 1,5 | 100,0 | | |

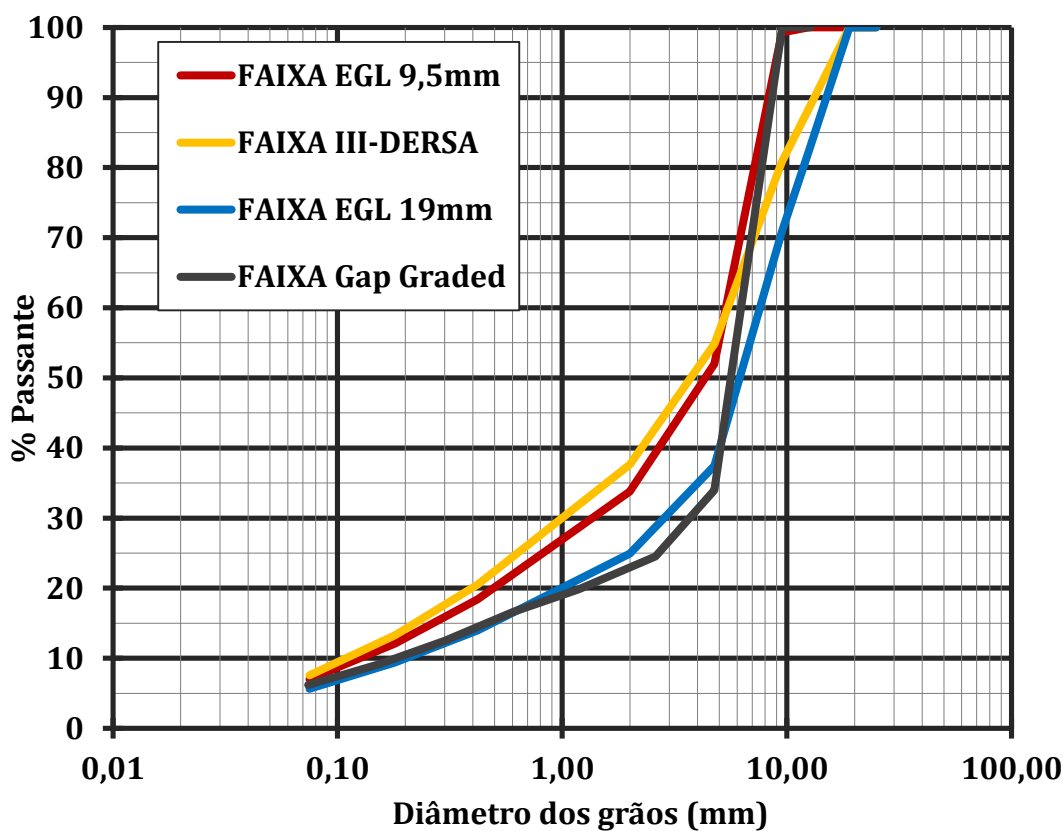


Figura 4.1: Curvas granulométricas das misturas asfálticas estudadas

As Tabelas 4.6 a 4.8 apresentam de forma resumida os parâmetros determinados na dosagem das misturas com CAP-Borr-1, CAP-Borr-2 e CAP 30/45, respectivamente. De modo geral, observa-se que os teores de projeto nas misturas com CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2 são de 0,5% a 1,0% maiores que no CAP 30/45.

Tabela 4.6: Resumo da dosagem das misturas asfálticas com o CAP-Borr1

| ID MISTURA | k1 | k2 | k3 | k4 |
|--|--------------------|-------------|--------------|---------------|
| Faixa Granulométrica | Faixa III DERSA | EGL 19mm | EGL 9,5mm | Gap Graded |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%) | 5,1 | 5,2 | 5,6 | 5,5 |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%) | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Densidade aparente dos agregados combinados (g/cm ³) | 2,611 | 2,619 | 2,611 | 2,619 |
| Densidade efetiva dos agregados combinados (g/cm ³) | 2,643 | 2,645 | 2,647 | 2,648 |
| Densidade aparente da mistura compactada (g/cm ³) | 2,352 | 2,343 | 2,332 | 2,313 |
| Densidade máxima da mistura (g/cm ³) | 2,446 | 2,444 | 2,432 | 2,437 |
| Volume de vazios de projeto (%) | 3,9 | 4,1 | 4,1 | 5,1 |
| Vazios de agregado mineral (%) | 14,8 | 15,2 | 15,9 | 16,5 |
| Vazios cheios de asfalto (%) | 73,8 | 72,8 | 74,1 | 69,3 |
| Resistência à tração (MPa) | 1,8 | 1,7 | 1,5 | 1,5 |
| Relação Fíler/Asfalto | 1,6 | 1,2 | 1,4 | 1,2 |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%) | 12,1 | 12,4 | 13,3 | 13,1 |

Tabela 4.7: Resumo da dosagem das misturas asfálticas com o CAP-Borr2

| ID MISTURA | k6 | k7 | k7 | k8 |
|--|--------------------|-------------|--------------|---------------|
| Faixa Granulométrica | Faixa III DERSA | EGL 19mm | EGL 9,5mm | Gap Graded |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%) | 5,5 | 5 | 5,3 | 5,9 |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%) | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 0,5 |
| Densidade aparente dos agregados combinados (g/cm ³) | 2,62 | 2,619 | 2,611 | 2,608 |
| Densidade efetiva dos agregados combinados (g/cm ³) | 2,647 | 2,636 | 2,639 | 2,641 |
| Densidade aparente da mistura compactada (g/cm ³) | 2,34 | 2,347 | 2,344 | 2,3 |
| Densidade máxima da mistura (g/cm ³) | 2,436 | 2,444 | 2,44 | 2,416 |
| Volume de vazios de projeto (%) | 3,9 | 4,0 | 4,0 | 4,8 |
| Vazios de agregado mineral (%) | 15,6 | 14,9 | 15 | 17 |
| Vazios cheios de asfalto (%) | 74,8 | 73,3 | 73,6 | 71,7 |
| Resistência à tração (MPa) | 1,6 | 1,5 | 1,8 | 1,2 |
| Relação Fíler/Asfalto | 1,5 | 1,2 | 1,5 | 1,1 |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%) | 13,1 | 11,9 | 12,6 | 13,9 |

Tabela 4.8: Resumo da dosagem das misturas asfálticas com o CAP 30/45

| ID MISTURA | k9 | k10 | k11 | k12 |
|--|--------------------|-------------|--------------|---------------|
| Faixa Granulométrica | Faixa III DERSA | EGL 19mm | EGL 9,5mm | Gap Graded |
| Teor de Ligante Asfáltico em peso (%) | 4,6 | 4,4 | 4,6 | 4,9 |
| Absorção de asfalto pelo agregado (%) | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,4 |
| Densidade aparente dos agregados combinados (g/cm ³) | 2,613 | 2,619 | 2,611 | 2,608 |
| Densidade efetiva dos agregados combinados (g/cm ³) | 2,643 | 2,642 | 2,639 | 2,634 |
| Densidade aparente da mistura compactada (g/cm ³) | 2,371 | 2,37 | 2,361 | 2,321 |
| Densidade máxima da mistura (g/cm ³) | 2,46 | 2,467 | 2,457 | 2,442 |
| Volume de vazios de projeto (%) | 3,6 | 3,9 | 3,9 | 5,0 |
| Vazios de agregado mineral (%) | 13,4 | 13,5 | 13,7 | 15,3 |
| Vazios cheios de asfalto (%) | 72,9 | 70,9 | 71,6 | 67,7 |
| Resistência à tração (MPa) | 2,5 | 2,0 | 2,3 | 2,0 |
| Relação Fíler/Asfalto | 1,8 | 1,4 | 1,7 | 1,4 |
| Teor de Ligante Asfáltico em volume (%) | 11,2 | 10,7 | 11,2 | 11,8 |

4.2 PARÂMETROS MECÂNICOS

Após determinação dos parâmetros de projeto das misturas asfálticas, foram moldados os corpos de prova nas dimensões adequadas para determinação dos parâmetros mecânicos nos seguintes ensaios:

- resistência à tração (DNIT ME 134/2010);
- dano por umidade induzida (AASHTO T 283-14);
- módulo de Resiliência (DNIT ME 135/2010);
- módulo dinâmico (AASHTO T 342/11);
- *flow number*(AASHTO T 342/11);
- fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos (AASHTO T 310-10).

Nos itens seguintes são apresentados os resultados desses ensaios e também é realizada uma análise comparativa, após análise estatística.

4.2.1. Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração foi executado de acordo com as recomendações da normativa DNIT ME 134/2010. Para cada mistura asfáltica em estudo foram moldados três corpos de prova e testados na temperatura de 25°C. Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 4.9 e nessa tabela também são apresentados os resultados de resistência à tração obtidos durante a dosagem das misturas asfálticas.

Tabela 4.9: Resultados de Resistência à Tração, obtido na dosagem das misturas asfálticas e no teor de ligante asfáltico de projeto

| ID Mistura | Ligante Asfáltico | Faixa Granulométrica | RT obtido na dosagem (MPa) | RT obtido no teor de dosagem (MPa) | Desvio Padrão do RT obtido no teor de dosagem |
|------------|-------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------------|---|
| k1 | Borr-1 | Faixa III-DERSA | 1,50 | 1,87 | 0,09 |
| k2 | Borr-1 | EGL 19mm | 1,80 | 1,95 | 0,04 |
| k3 | Borr-1 | EGL 9,5mm | 1,70 | 2,12 | 0,07 |
| k4 | Borr-1 | Gap Graded | 1,50 | 1,98 | 0,06 |
| k5 | Borr-2 | Faixa III-DERSA | 1,80 | 1,96 | 0,10 |
| k6 | Borr-2 | EGL 19mm | 1,60 | 1,93 | 0,05 |
| k7 | Borr-2 | EGL 9,5mm | 1,50 | 2,22 | 0,08 |
| k8 | Borr-2 | Gap Graded | 1,20 | 1,62 | 0,05 |
| k9 | CAP 30/45 | Faixa III-DERSA | 2,30 | 2,40 | 0,08 |
| k10 | CAP 30/45 | EGL 19mm | 2,50 | 2,00 | 0,17 |
| k11 | CAP 30/45 | EGL 9,5mm | 2,00 | 2,48 | 0,20 |
| k12 | CAP 30/45 | Gap Graded | 2,00 | 1,70 | 0,05 |

Nas Figuras 4.2 e 4.3 também são apresentados os resultados da Tabela 4.9 e nota-se que as tendências observadas na RT obtida na dosagem são muito parecidas com as obtidas na RT de corpos de prova moldados no teor de projeto. De forma geral, o CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2 apresentaram valores de RT muito próximos entre si e a RT foi superior nos CPs moldados com CAP 30/45. Esse comportamento era esperado, conforme estudado na revisão bibliográfica, já que as misturas asfálticas com CAP-Borracha têm maiores teores de asfalto, produzindo em tensões

máximas uma lubrificação entre os agregados. No entanto, esse comportamento não é crítico, como será visto mais adiante nos demais ensaios.

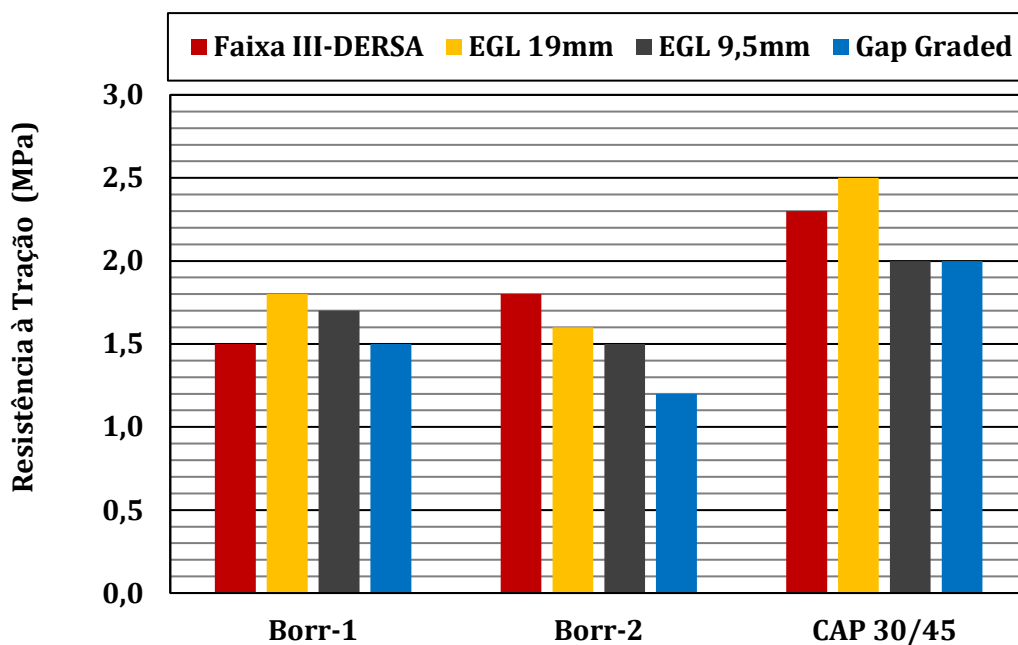


Figura 4.2: Resultados de Resistência à Tração obtidos na dosagem das misturas asfálticas

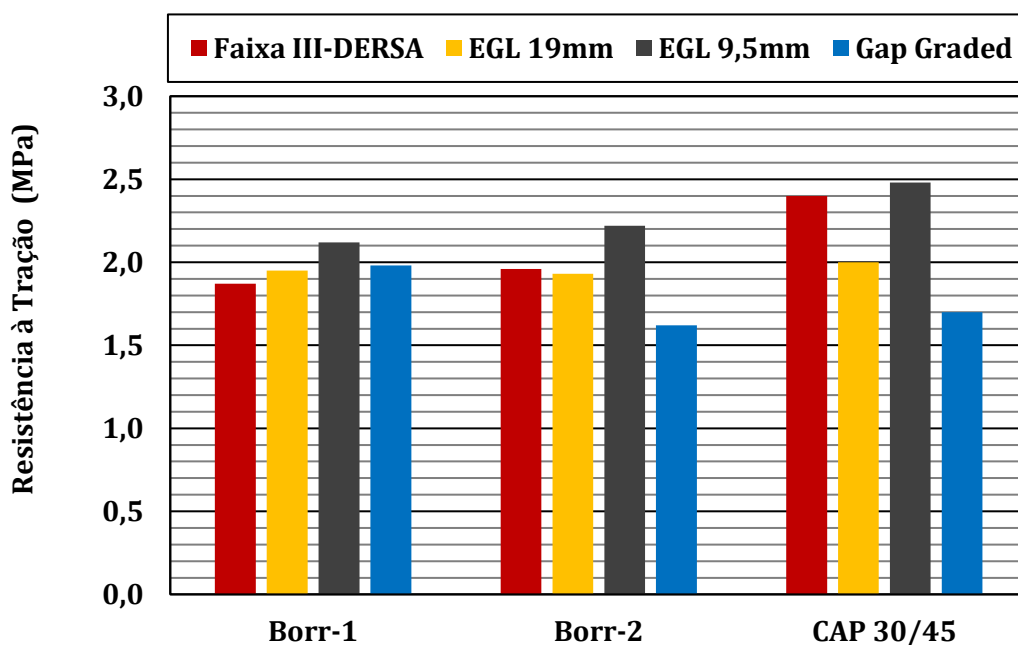


Figura 4.3: Resultados de Resistência à Tração obtidos no teor de ligante asfáltico de projeto

Os resultados obtidos neste parâmetro, para todos os corpos de prova, foram analisados estatisticamente por meio do software Minitab, com a ferramenta Análise de Variância (ANOVA). Os

resultados dessa análise são apresentados na Tabela 4.10 e nas Figuras 4.4 e 4.5. Observa-se que, tanto os fatores CAP e Granulometria são significativos estatisticamente neste parâmetro, assim como a interação entre estes fatores. Dos resultados da Tabela 4.10 pode se afirmar que o fator granulometria (B), teve maior influência nos resultados de resistência à tração, do que o fator CAP (A).

Tabela 4.10: Resultados da Análise de Variância para o parâmetro Resistência à Tração

| Fatores e Interações | Grau de Liberdade | Soma dos Quadrados | F Calculado | F Tabelaado | P | Significativo |
|----------------------|-------------------|--------------------|---------------|---------------|-------|---------------|
| CAP (A) | 2 | 0,2975 | 14,86 | 3,40 | 0,000 | Sim |
| Granulometria (B) | 3 | 1,2484 | 41,56 | 3,01 | 0,000 | Sim |
| (A)x(B) | 6 | 0,6091 | 10,14 | 2,51 | 0,000 | Sim |
| Erro | 24 | 50,646 | | | | |
| Total | 35 | 725,47 | | | | |

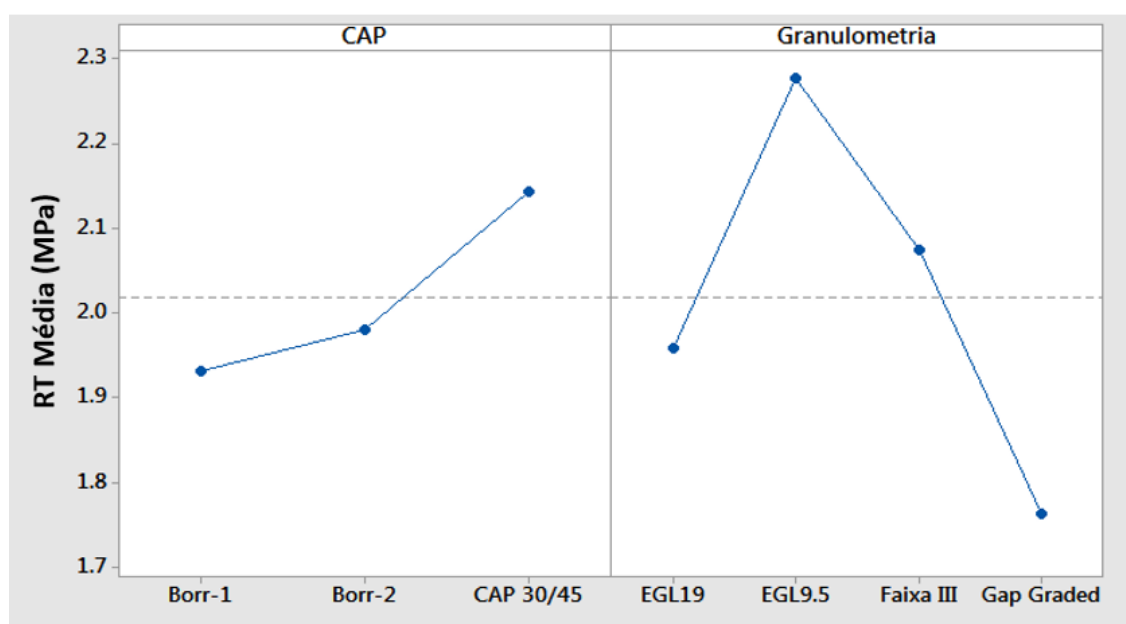


Figura 4.4: Interações individuais dos fatores CAP e Granulometria para a resistência à tração

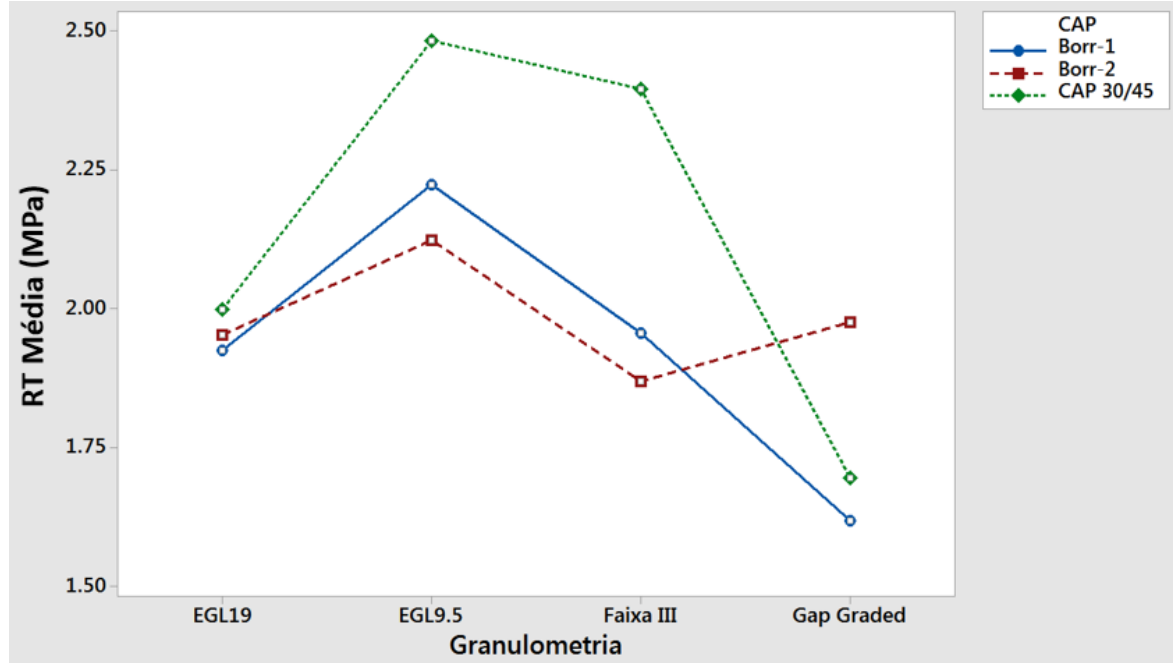


Figura 4.5: Interações combinadas dos fatores CAP e Granulometria para a resistência à tração

4.2.2. Dano por umidade induzida

O ensaio de Dano por Umidade Induzida (DUI) é um método utilizado para avaliar a adesividade do ligante asfáltico nos agregados minerais empregados em uma mistura asfáltica. Vale lembrar que as misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa incluíram 1,5% de cal hidratada do tipo CH-1 como aditivo melhorador de adesividade. Para execução deste ensaio foi seguido o procedimento recomendado pela AASHTO T 283, no qual 6 corpos de prova (CPs) são moldados com o teor asfáltico de projeto com a energia necessária para atingir o volume de vazios de 7%. Esses CPs são divididos em dois conjuntos, um de controle conformado por 3 CPs, e os outros 3 CPs são empregados para realizar o condicionamento. Esse condicionamento consiste em saturar de 70% a 80% dos vazios com água, submeter os CPs, primeiro à temperatura de -18°C durante 16 horas e depois submergê-los em banho maria na temperatura de 60°C durante 24 horas. Após esse processo, os CPs são colocados em outro banho maria na temperatura de 25°C durante 2 horas, para realizar a ruptura por compressão diametral, assim como os CPs de controle.

O objetivo é realizar, após este procedimento, um comparativo das resistências à tração por compressão diametral do conjunto de controle e do conjunto condicionado, sendo que a resistência a tração retida deve ser superior a 70% para o conjunto condicionado, com relação ao conjunto de controle, conforme especificação do DNIT ES 031/2006. Um resumo dos resultados obtidos neste ensaio é apresentado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Resultados do ensaio de dano por umidade induzida

| ID Mistura | Ligante Asfáltico | Faixa Granulométrica | Condição | Vv médio (%) | Resistência à Tração (MPa) | Relação de Resistência à Tração (%) |
|---------------|----------------------|-------------------------|----------|--------------------|----------------------------------|--|
| | | | | | | |
| k1 | Borr-1 | Faixa III-DERSA | Seca | 7,1 | 1,21 | 89,0 |
| | | | Saturada | 7,1 | 1,08 | |
| k2 | Borr-1 | EGL 19mm | Seca | 7,2 | 1,04 | 91,7 |
| | | | Saturada | 6,7 | 0,96 | |
| k3 | Borr-1 | EGL 9,5mm | Seca | 7,0 | 1,28 | 88,8 |
| | | | Saturada | 7,1 | 1,14 | |
| k4 | Borr-1 | Gap Graded | Seca | 6,5 | 1,26 | 90,8 |
| | | | Saturada | 6,5 | 1,15 | |
| k5 | Borr-2 | Faixa III-DERSA | Seca | 7,7 | 0,89 | 89,0 |
| | | | Saturada | 7,8 | 0,80 | |
| k6 | Borr-2 | EGL 19mm | Seca | 6,1 | 1,10 | 95,8 |
| | | | Saturada | 6,1 | 1,06 | |
| k7 | Borr-2 | EGL 9,5mm | Seca | 7,9 | 1,08 | 81,7 |
| | | | Saturada | 7,7 | 0,89 | |
| k8 | Borr-2 | Gap Graded | Seca | 6,4 | 0,96 | 92,8 |
| | | | Saturada | 6,8 | 0,89 | |
| k9 | CAP 30/45 | Faixa III-DERSA | Seca | 6,7 | 1,66 | 87,2 |
| | | | Saturada | 6,8 | 1,45 | |
| k10 | CAP 30/45 | EGL 19mm | Seca | 6,8 | 1,48 | 96,1 |
| | | | Saturada | 7,0 | 1,42 | |
| k11 | CAP 30/45 | EGL 9,5mm | Seca | 6,8 | 1,67 | 97,6 |
| | | | Saturada | 6,3 | 1,63 | |
| k12 | CAP 30/45 | Gap Graded | Seca | 5,6 | 1,65 | 97,5 |
| | | | Saturada | 5,6 | 1,61 | |

A Figura 4.6 apresenta os valores de resistência à tração obtida nos corpos de prova sem condicionamento, com volume de vazios aproximado de 7,0%. Nota-se que as misturas asfálticas com asfalto borracha apresentam resistência à tração levemente inferior à mistura asfáltica com CAP 30/45. Já na Figura 4.7 são apresentados os resultados de RT obtida nos CPs com condicionamento, na qual pode-se observar a mesma tendência.

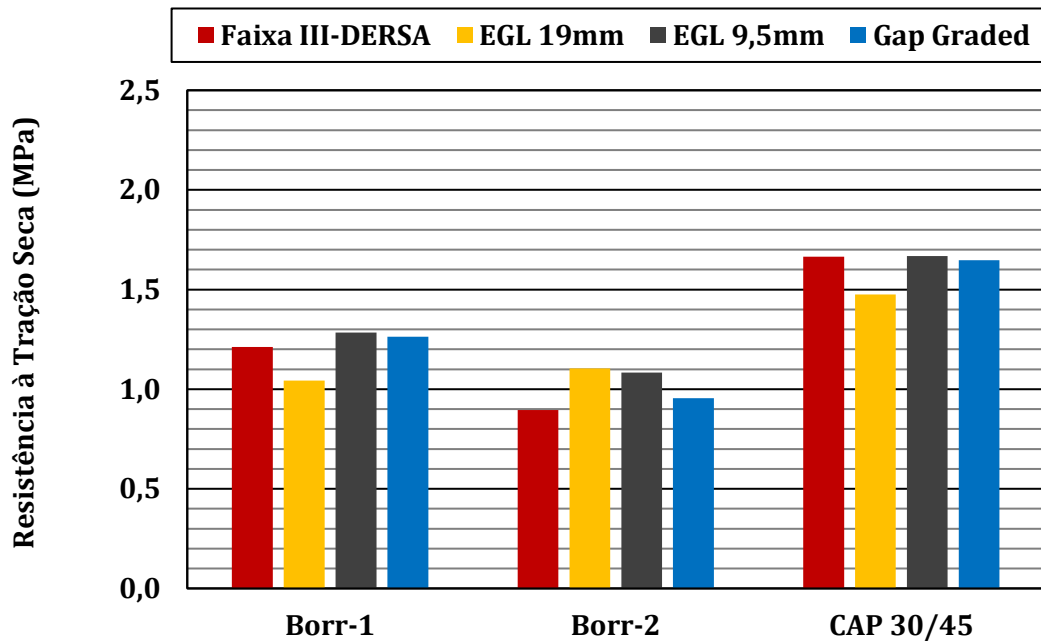


Figura 4.6: Resultados de resistência à tração seca ou sem condicionamento, obtida no ensaio de DUI

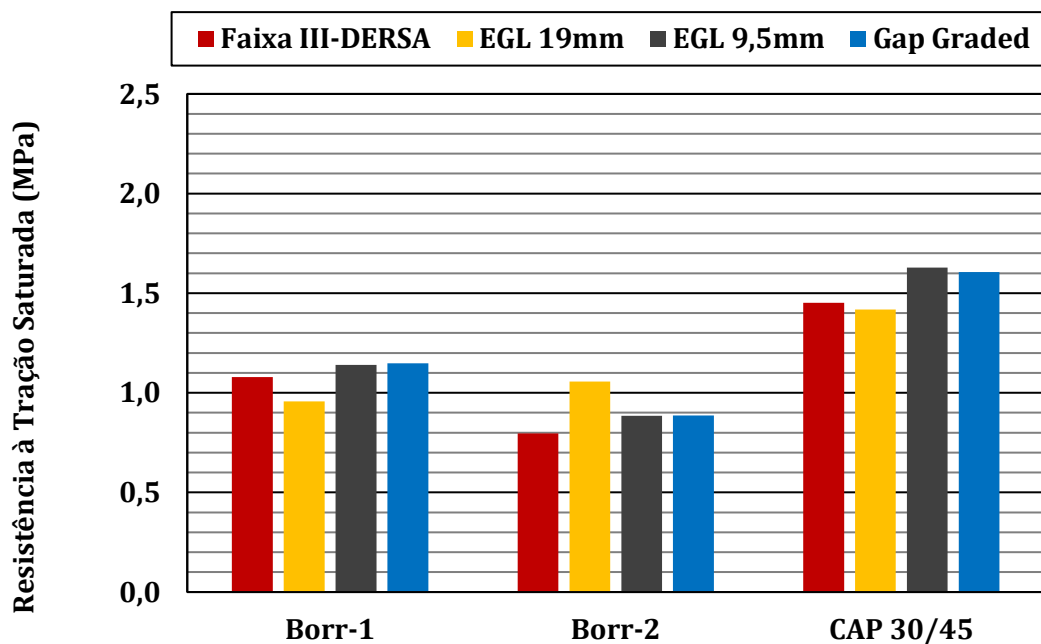


Figura 4.7: Resultados de resistência à tração saturada ou com condicionamento, obtida no ensaio de DUI

Na Figura 4.8 é apresentada a resistência à tração retida, expressada em porcentagem, que indica a relação entre a RT obtida em CPs condicionados e não condicionados. A razão mínima de 75% tem sido usualmente empregada pelo Grupo CCR para garantir misturas asfálticas com boa resistência à

ação deletéria de água e boa adesividade. De forma geral, nota-se na Figura 4.8 que as misturas asfálticas com todas as faixas granulométricas estudadas, atendem a essa especificação. Nesse parâmetro não foi notada diferenças notórias nas misturas asfálticas com CAP 30/45 ou asfalto borracha.

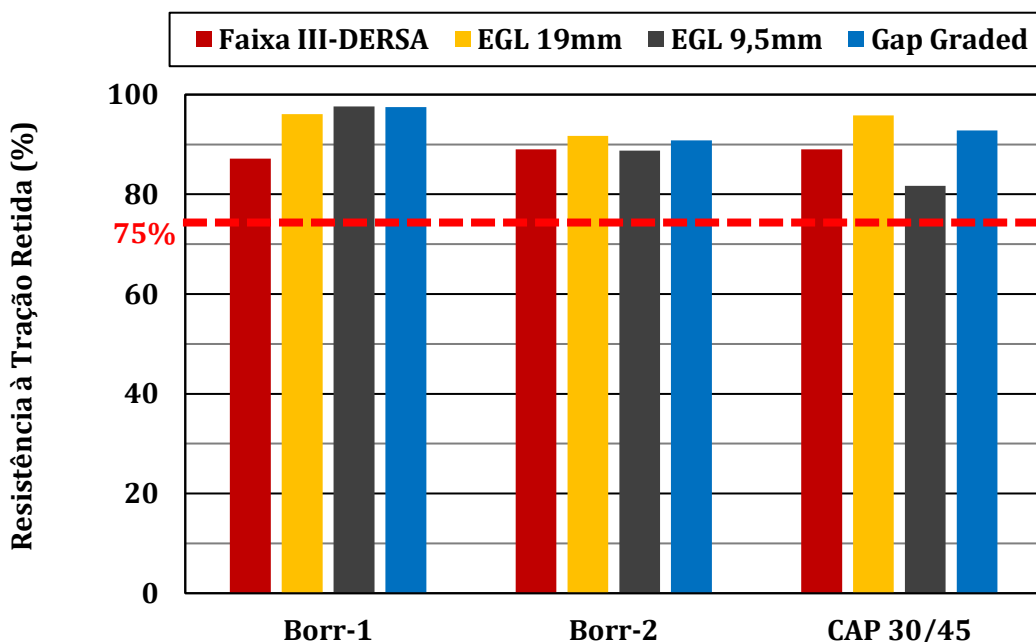


Figura 4.8: Dano por umidade induzida das misturas asfálticas estudadas

4.2.3. Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado de acordo com as especificações da Norma DNIT ME 135/2010. Para estudo das misturas asfálticas foram moldados três corpos de prova no teor de ligante asfáltico de projeto, com volume de vazios de 4,0% e testados na temperatura de 25°C. Os resultados obtidos nesse ensaio são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Módulo de Resiliência médio das misturas asfálticas

| ID Mistura | Ligante Asfáltico | Faixa Granulométrica | MR médio (MPa) | Desvio Padrão do MR |
|------------|-------------------|----------------------|----------------|---------------------|
| k1 | Borr-1 | Faixa III-DERSA | 3.759 | 483 |
| k2 | Borr-1 | EGL 19mm | 4.132 | 286 |
| k3 | Borr-1 | EGL 9,5mm | 4.700 | 633 |
| k4 | Borr-1 | Gap Graded | 3.921 | 112 |
| k5 | Borr-2 | Faixa III-DERSA | 5.834 | 956 |
| k6 | Borr-2 | EGL 19mm | 5.418 | 847 |
| k7 | Borr-2 | EGL 9,5mm | 6.377 | 115 |
| k8 | Borr-2 | Gap Graded | 3.864 | 112 |
| k9 | CAP 30/45 | Faixa III-DERSA | 7.679 | 251 |
| k10 | CAP 30/45 | EGL 19mm | 6.824 | 449 |
| k11 | CAP 30/45 | EGL 9,5mm | 8.234 | 566 |
| k12 | CAP 30/45 | Gap Graded | 5.273 | 174 |

Na Figura 4.9 também são apresentados os resultados de módulo de resiliência em função da faixa granulométrica e do tipo de ligante asfáltico empregado. Nota-se que os maiores valores de rigidez foram obtidos nas misturas com CAP 30/45, seguidos pelas misturas com CAP-Borr-2 e finalmente pelas misturas com CAP-Borr-1.

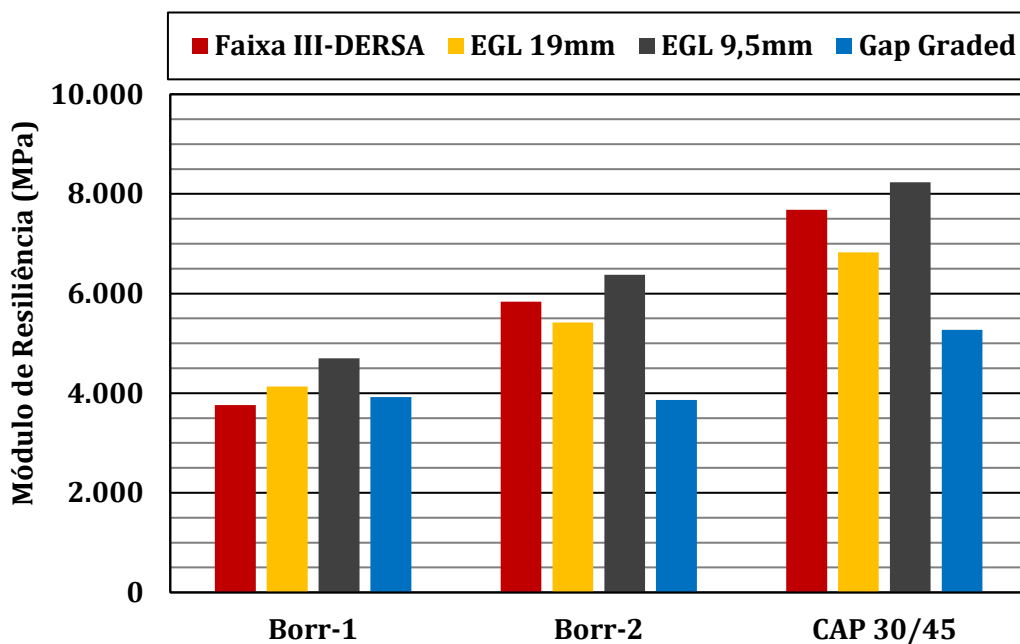


Figura 4.9: Módulo de Resiliência médio das misturas asfálticas

Os resultados de módulo de resiliência de todos os corpos de prova foram analisados estatisticamente por meio do software Minitab, com a ferramenta Análise de Variância (ANOVA), com o objetivo de identificar tendências e influências dos fatores avaliados. Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 4.13 e nas Figuras 4.10 e 4.11. Observa-se que os fatores CAP (A) e Granulometria (B) são significativos estatisticamente para este parâmetro, sendo que o CAP (A) tem maior influência no módulo de resiliência das misturas asfálticas.

Tabela 4.13: Resultados da Análise de Variância para o parâmetro módulo de resiliência

| Fatores e Interações | Grau de Liberdade | Soma dos Quadrados | <i>F</i> Calculado | <i>F</i> Tabelado | <i>P</i> | Significativo |
|----------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|----------|---------------|
| CAP (A) | 2 | 54235338 | 55,81 | 3,40 | 0,000 | Sim |
| Granulometria (B) | 3 | 28509998 | 19,56 | 3,01 | 0,000 | Sim |
| (A)x(B) | 6 | 9090709 | 3,12 | 2,51 | 0,021 | Sim |
| Erro | 24 | 11662378 | | | | |
| Total | 35 | 103498423 | | | | |

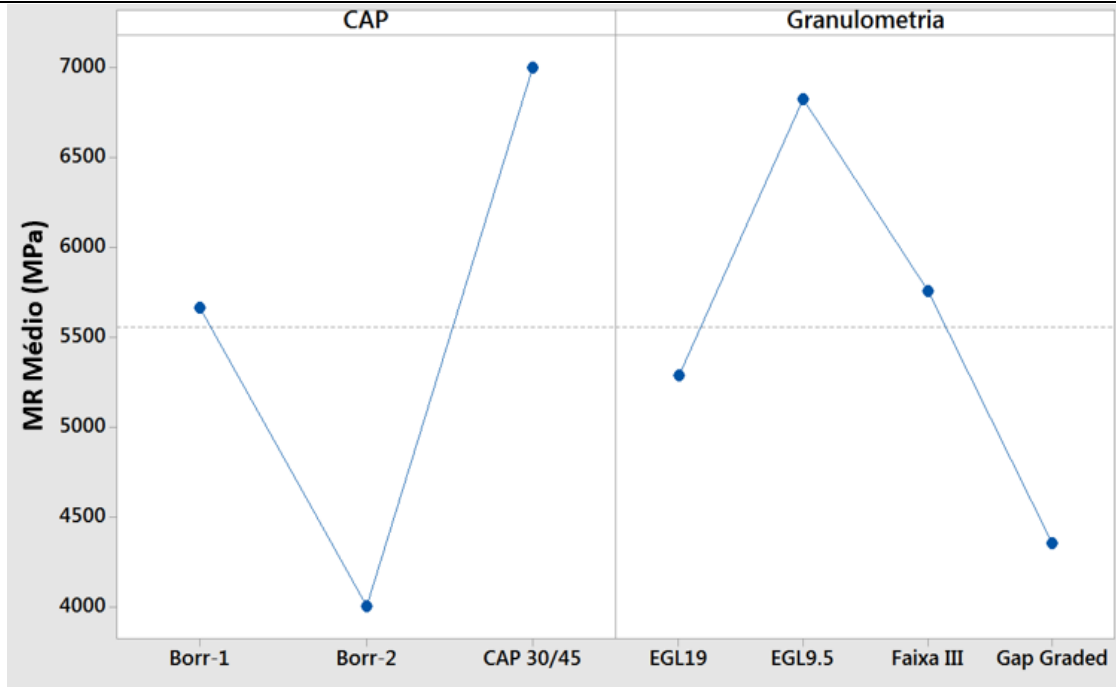


Figura 4.10: Interações individuais dos fatores CAP e Granulometria para o módulo de resiliência

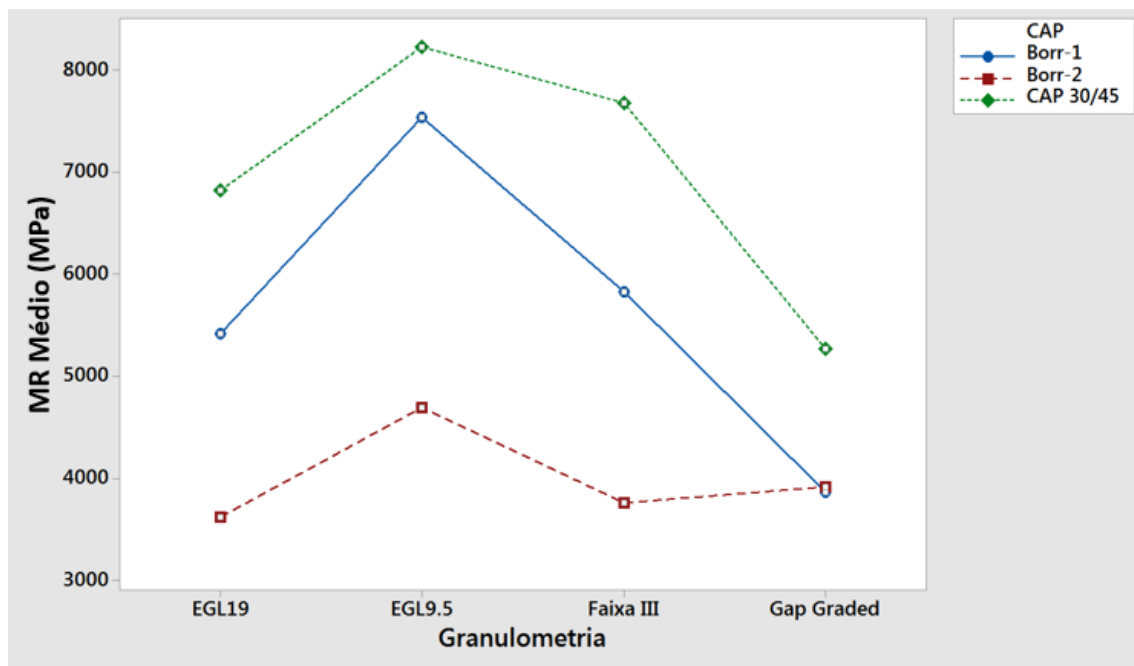


Figura 4.11: Interações combinadas dos fatores CAP e Granulometria para o módulo de resiliência

4.2.4. Módulo Dinâmico

O ensaio de módulo dinâmico foi realizado seguindo as recomendações da Norma AASHTO T 342/11. Três corpos de prova foram testados para cada mistura asfáltica e durante o ensaio, três LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) foram empregados para determinação dos deslocamentos induzidos pela aplicação de carga. Vale salientar que os CPs foram moldados no compactador giratório com diâmetro de 150mm e aproximadamente 175mm de altura, como mostra a Figura 4.12. O núcleo destes CPs foi extraído para obter CPs de ensaio de 100mm de diâmetro e 150mm de altura, como mostra a Figura 4.13.



Figura 4.12: Corpo de prova produzido no Compactador Giratório Superpave



Figura 4.13: Corpos de provas empregados no ensaio de módulo dinâmico das misturas asfálticas

O ensaio de módulo dinâmico foi executado nas temperaturas de 4,4; 21,1; 37,8 e 54,4°C, com frequências de 25; 10; 5,0; 1,0; 0,5 e 0,1Hz. Os resultados obtidos nessa varredura de temperaturas e frequências é utilizado usualmente para a construção de curvas mestres. Neste estudo foi aplicada essa técnica para facilitar a visualização dos resultados. Nas Tabelas 4.14, 4.15 e 4.16 são apresentados os resultados da construção das curvas mestres das misturas asfálticas com CAP-Borr-1, CAP-Borr-2 e CAP 30/45, respectivamente.

Tabela 4.14: Módulo dinâmico das misturas asfálticas com CAP-Borr-1

| k1 | | k2 | | k3 | | k4 | |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Faixa III DERSA | | EGL 19mm | | EGL 9,5mm | | GAP | |
| Módulo Dinâmico E* (MPa) | Frequência Reduzida fr (Hz) | Módulo Dinâmico E* (MPa) | Frequência Reduzida fr (Hz) | Módulo Dinâmico E* (MPa) | Frequência Reduzida fr (Hz) | Módulo Dinâmico E* (MPa) | Frequência Reduzida fr (Hz) |
| 18.976 | 5,59 | 19.414 | 5,59 | 20.022 | 5,59 | 19.813 | 5,59 |
| 18.437 | 5,20 | 18.909 | 5,20 | 19.618 | 5,20 | 19.372 | 5,20 |
| 17.965 | 4,89 | 18.468 | 4,89 | 19.258 | 4,89 | 18.981 | 4,89 |
| 16.636 | 4,20 | 17.223 | 4,20 | 18.203 | 4,20 | 17.847 | 4,20 |
| 15.955 | 3,89 | 16.583 | 3,89 | 17.642 | 3,89 | 17.249 | 3,89 |
| 14.118 | 3,20 | 14.845 | 3,20 | 16.060 | 3,20 | 15.578 | 3,20 |
| 15.051 | 3,53 | 15.731 | 3,53 | 16.877 | 3,53 | 16.437 | 3,53 |
| 13.945 | 3,14 | 14.681 | 3,14 | 15.906 | 3,14 | 15.417 | 3,14 |
| 13.040 | 2,83 | 13.813 | 2,83 | 15.084 | 2,83 | 14.558 | 2,83 |
| 10.762 | 2,14 | 11.594 | 2,14 | 12.902 | 2,14 | 12.301 | 2,14 |
| 9.737 | 1,83 | 10.574 | 1,83 | 11.865 | 1,83 | 11.240 | 1,83 |
| 7.385 | 1,14 | 8.169 | 1,14 | 9.338 | 1,14 | 8.682 | 1,14 |
| 8.253 | 1,40 | 9.068 | 1,40 | 10.295 | 1,40 | 9.646 | 1,40 |
| 6.947 | 1,00 | 7.709 | 1,00 | 8.844 | 1,00 | 8.187 | 1,00 |
| 6.015 | 0,70 | 6.718 | 0,70 | 7.765 | 0,70 | 7.111 | 0,70 |
| 4.125 | 0,00 | 4.640 | 0,00 | 5.456 | 0,00 | 4.840 | 0,00 |
| 3.451 | -0,30 | 3.874 | -0,30 | 4.591 | -0,30 | 4.002 | -0,30 |
| 2.224 | -1,00 | 2.442 | -1,00 | 2.957 | -1,00 | 2.450 | -1,00 |
| 3.038 | -0,51 | 3.397 | -0,51 | 4.049 | -0,51 | 3.482 | -0,51 |
| 2.362 | -0,91 | 2.605 | -0,91 | 3.144 | -0,91 | 2.625 | -0,91 |
| 1.945 | -1,21 | 2.110 | -1,21 | 2.575 | -1,21 | 2.095 | -1,21 |
| 1.240 | -1,91 | 1.266 | -1,91 | 1.600 | -1,91 | 1.212 | -1,91 |
| 1.028 | -2,21 | 1.013 | -2,21 | 1.305 | -2,21 | 955 | -2,21 |
| 684 | -2,91 | 610 | -2,91 | 833 | -2,91 | 558 | -2,91 |
| 1.025 | -2,21 | 1.010 | -2,21 | 1.302 | -2,21 | 952 | -2,21 |
| 809 | -2,61 | 754 | -2,61 | 1.003 | -2,61 | 698 | -2,61 |
| 683 | -2,91 | 608 | -2,91 | 831 | -2,91 | 556 | -2,91 |
| 481 | -3,61 | 381 | -3,61 | 560 | -3,61 | 341 | -3,61 |
| 421 | -3,91 | 317 | -3,91 | 482 | -3,91 | 283 | -3,91 |
| 324 | -4,61 | 217 | -4,61 | 359 | -4,61 | 193 | -4,61 |

Tabela 4.15: Módulo dinâmico das misturas asfálticas com CAP-Borr-2

| k5 | | k6 | | k7 | | k8 | |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Faixa III DERSA | | EGL 19mm | | EGL 9,5mm | | GAP | |
| Módulo Dinâmico E* (MPa) | Frequência Reduzida fr (Hz) | Módulo Dinâmico E* (MPa) | Frequência Reduzida fr (Hz) | Módulo Dinâmico E* (MPa) | Frequência Reduzida fr (Hz) | Módulo Dinâmico E* (MPa) | Frequência Reduzida fr (Hz) |
| 18.908 | 5,59 | 18.425 | 5,59 | 18.458 | 5,59 | 20.669 | 5,59 |
| 18.366 | 5,20 | 17.855 | 5,20 | 17.962 | 5,20 | 20.319 | 5,20 |
| 17.898 | 4,89 | 17.369 | 4,89 | 17.550 | 4,89 | 19.998 | 4,89 |
| 16.596 | 4,20 | 16.046 | 4,20 | 16.460 | 4,20 | 19.016 | 4,20 |
| 15.936 | 3,89 | 15.388 | 3,89 | 15.931 | 3,89 | 18.472 | 3,89 |
| 14.174 | 3,20 | 13.662 | 3,20 | 14.561 | 3,20 | 16.869 | 3,20 |
| 15.067 | 3,53 | 14.532 | 3,53 | 15.249 | 3,53 | 17.708 | 3,53 |
| 14.009 | 3,14 | 13.503 | 3,14 | 14.436 | 3,14 | 16.709 | 3,14 |
| 13.147 | 2,83 | 12.673 | 2,83 | 13.780 | 2,83 | 15.838 | 2,83 |
| 10.979 | 2,14 | 10.613 | 2,14 | 12.133 | 2,14 | 13.442 | 2,14 |
| 10.001 | 1,83 | 9.692 | 1,83 | 11.379 | 1,83 | 12.267 | 1,83 |
| 7.731 | 1,14 | 7.562 | 1,14 | 9.558 | 1,14 | 9.349 | 1,14 |
| 8.573 | 1,40 | 8.352 | 1,40 | 10.249 | 1,40 | 10.460 | 1,40 |
| 7.303 | 1,00 | 7.161 | 1,00 | 9.197 | 1,00 | 8.773 | 1,00 |
| 6.385 | 0,70 | 6.297 | 0,70 | 8.398 | 0,70 | 7.518 | 0,70 |
| 4.479 | 0,00 | 4.490 | 0,00 | 6.580 | 0,00 | 4.879 | 0,00 |
| 3.780 | -0,30 | 3.818 | -0,30 | 5.832 | -0,30 | 3.926 | -0,30 |
| 2.470 | -1,00 | 2.535 | -1,00 | 4.236 | -1,00 | 2.234 | -1,00 |
| 3.346 | -0,51 | 3.396 | -0,51 | 5.335 | -0,51 | 3.347 | -0,51 |
| 2.620 | -0,91 | 2.684 | -0,91 | 4.436 | -0,91 | 2.419 | -0,91 |
| 2.163 | -1,21 | 2.228 | -1,21 | 3.810 | -1,21 | 1.868 | -1,21 |
| 1.371 | -1,91 | 1.422 | -1,91 | 2.561 | -1,91 | 1.007 | -1,91 |
| 1.127 | -2,21 | 1.167 | -2,21 | 2.117 | -2,21 | 775 | -2,21 |
| 727 | -2,91 | 743 | -2,91 | 1.303 | -2,91 | 439 | -2,91 |
| 1.125 | -2,21 | 1.165 | -2,21 | 2.113 | -2,21 | 773 | -2,21 |
| 873 | -2,61 | 899 | -2,61 | 1.614 | -2,61 | 555 | -2,61 |
| 725 | -2,91 | 741 | -2,91 | 1.299 | -2,91 | 438 | -2,91 |
| 487 | -3,61 | 484 | -3,61 | 754 | -3,61 | 271 | -3,61 |
| 417 | -3,91 | 408 | -3,91 | 588 | -3,91 | 227 | -3,91 |
| 303 | -4,61 | 284 | -4,61 | 319 | -4,61 | 162 | -4,61 |

Tabela 4.16: Módulo dinâmico das misturas asfálticas com CAP 30/45

| k9 | | k10 | | k11 | | k12 | |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Faixa III DERSA | | EGL 19mm | | EGL 9,5mm | | GAP | |
| Módulo Dinâmico E* (MPa) | Frequência Reduzida fr (Hz) | Módulo Dinâmico E* (MPa) | Frequência Reduzida fr (Hz) | Módulo Dinâmico E* (MPa) | Frequência Reduzida fr (Hz) | Módulo Dinâmico E* (MPa) | Frequência Reduzida fr (Hz) |
| 21.528 | 5,59 | 21.062 | 5,59 | 21.582 | 5,59 | 21.012 | 5,59 |
| 21.344 | 5,20 | 20.802 | 5,20 | 21.349 | 5,20 | 20.788 | 5,20 |
| 21.169 | 4,89 | 20.561 | 4,89 | 21.131 | 4,89 | 20.575 | 4,89 |
| 20.604 | 4,20 | 19.809 | 4,20 | 20.450 | 4,20 | 19.886 | 4,20 |
| 20.273 | 3,89 | 19.384 | 3,89 | 20.063 | 3,89 | 19.482 | 3,89 |
| 19.228 | 3,20 | 18.098 | 3,20 | 18.879 | 3,20 | 18.216 | 3,20 |
| 19.788 | 3,53 | 18.778 | 3,53 | 19.506 | 3,53 | 18.892 | 3,53 |
| 19.119 | 3,14 | 17.967 | 3,14 | 18.757 | 3,14 | 18.083 | 3,14 |
| 18.504 | 2,83 | 17.244 | 2,83 | 18.084 | 2,83 | 17.345 | 2,83 |
| 16.656 | 2,14 | 15.167 | 2,14 | 16.128 | 2,14 | 15.158 | 2,14 |
| 15.661 | 1,83 | 14.101 | 1,83 | 15.108 | 1,83 | 14.008 | 1,83 |
| 12.903 | 1,14 | 11.287 | 1,14 | 12.369 | 1,14 | 10.930 | 1,14 |
| 14.005 | 1,40 | 12.388 | 1,40 | 13.450 | 1,40 | 12.139 | 1,40 |
| 12.304 | 1,00 | 10.700 | 1,00 | 11.788 | 1,00 | 10.286 | 1,00 |
| 10.929 | 0,70 | 9.382 | 0,70 | 10.469 | 0,70 | 8.843 | 0,70 |
| 7.663 | 0,00 | 6.395 | 0,00 | 7.400 | 0,00 | 5.645 | 0,00 |
| 6.334 | -0,30 | 5.230 | -0,30 | 6.165 | -0,30 | 4.449 | -0,30 |
| 3.727 | -1,00 | 3.018 | -1,00 | 3.739 | -1,00 | 2.321 | -1,00 |
| 5.479 | -0,51 | 4.495 | -0,51 | 5.372 | -0,51 | 3.718 | -0,51 |
| 4.028 | -0,91 | 3.269 | -0,91 | 4.021 | -0,91 | 2.550 | -0,91 |
| 3.117 | -1,21 | 2.513 | -1,21 | 3.163 | -1,21 | 1.871 | -1,21 |
| 1.625 | -1,91 | 1.291 | -1,91 | 1.724 | -1,91 | 870 | -1,91 |
| 1.213 | -2,21 | 957 | -2,21 | 1.312 | -2,21 | 624 | -2,21 |
| 627 | -2,91 | 482 | -2,91 | 703 | -2,91 | 300 | -2,91 |
| 1.209 | -2,21 | 954 | -2,21 | 1.308 | -2,21 | 621 | -2,21 |
| 825 | -2,61 | 642 | -2,61 | 913 | -2,61 | 406 | -2,61 |
| 625 | -2,91 | 480 | -2,91 | 701 | -2,91 | 299 | -2,91 |
| 349 | -3,61 | 257 | -3,61 | 398 | -3,61 | 162 | -3,61 |
| 282 | -3,91 | 203 | -3,91 | 321 | -3,91 | 130 | -3,91 |
| 187 | -4,61 | 127 | -4,61 | 211 | -4,61 | 86 | -4,61 |

O ligante asfáltico é um material termorreologicamente simples e, portanto, pode ser realizada a correspondência frequência-temperatura, sendo que, no traçado das curvas mestre, frequências baixas são equivalentes a temperaturas elevadas, e frequências elevadas são equivalentes a temperaturas baixas, pelo método da superposição de efeitos.

Na Figura 4.14 são apresentadas as curvas mestre das misturas asfálticas com granulometria Faixa III DERSA e moldadas com os três ligantes asfálticos selecionados para esta etapa do estudo. Nota-se nessa figura que em frequências baixas (temperaturas elevadas), as misturas asfálticas com CAP-Borracha apresentam maior rigidez quando comparadas com a mistura com CAP 30/45. Esse comportamento é desejável, já que as misturas asfálticas com maior rigidez em temperaturas elevadas são mais apropriadas para resistir à deformação permanente.

Nas frequências intermediárias, correspondente a temperaturas intermediárias, observa-se na Figura 4.14 que as misturas com CAP 30/45 apresentam rigidez superior às misturas com CAP-Borracha. No entanto, vale lembrar que em temperaturas intermediárias a rigidez elevada pode conduzir com maior facilidade ao trincamento por fadiga.

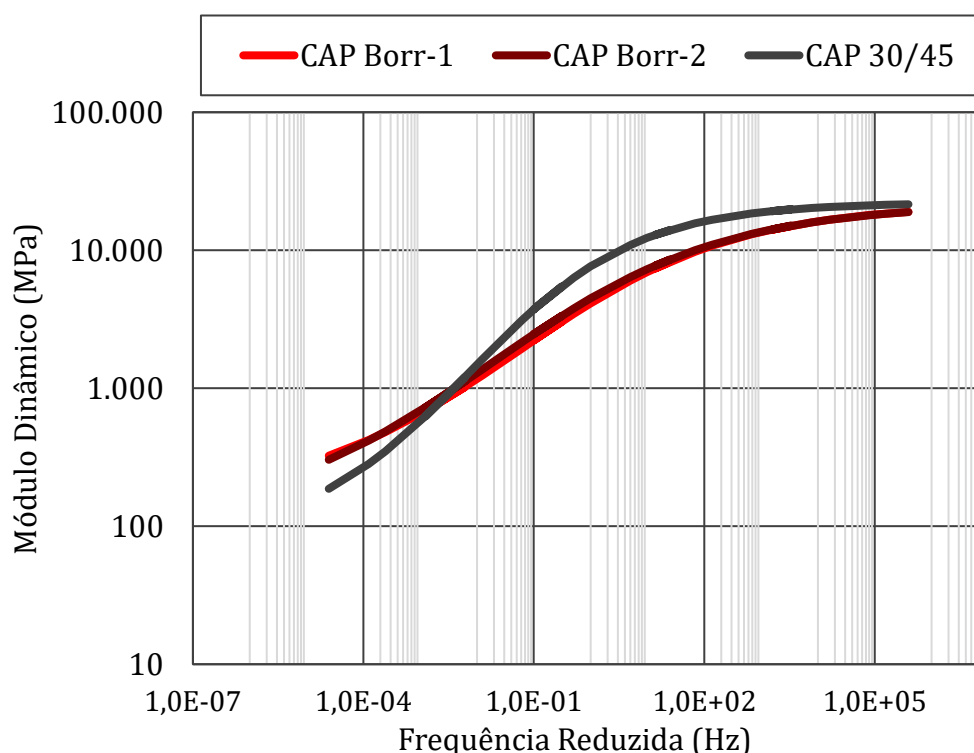


Figura 4.14: Curva mestre das misturas asfálticas Faixa III DERSA

Nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 são apresentadas as curvas mestre das misturas asfálticas com as granulometrias EGL 19mm, EGL 9,5mm e *Gap Graded*, respectivamente. Nota-se, de forma geral, a

mesma tendência descrita para a mistura asfáltica na Faixa III DERSA, as misturas com CAP-Borracha apresentariam melhor resistência ao trincamento por fadiga nas temperaturas intermediárias e à deformação permanente nas temperaturas elevadas.

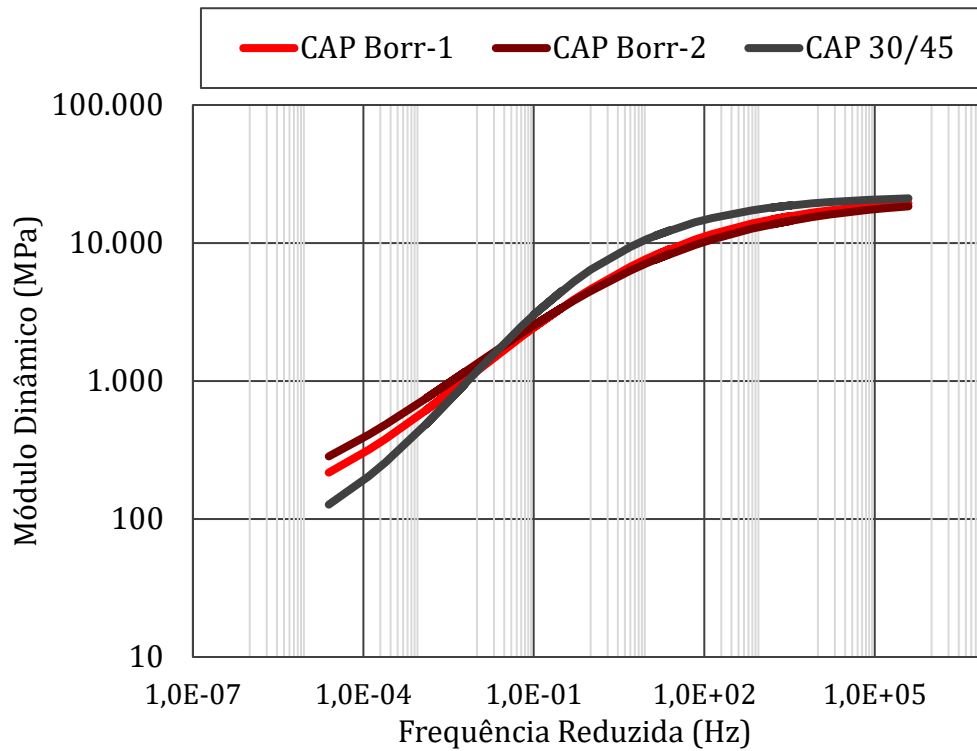


Figura 4.15: Curva mestre das misturas asfálticas EGL 19mm

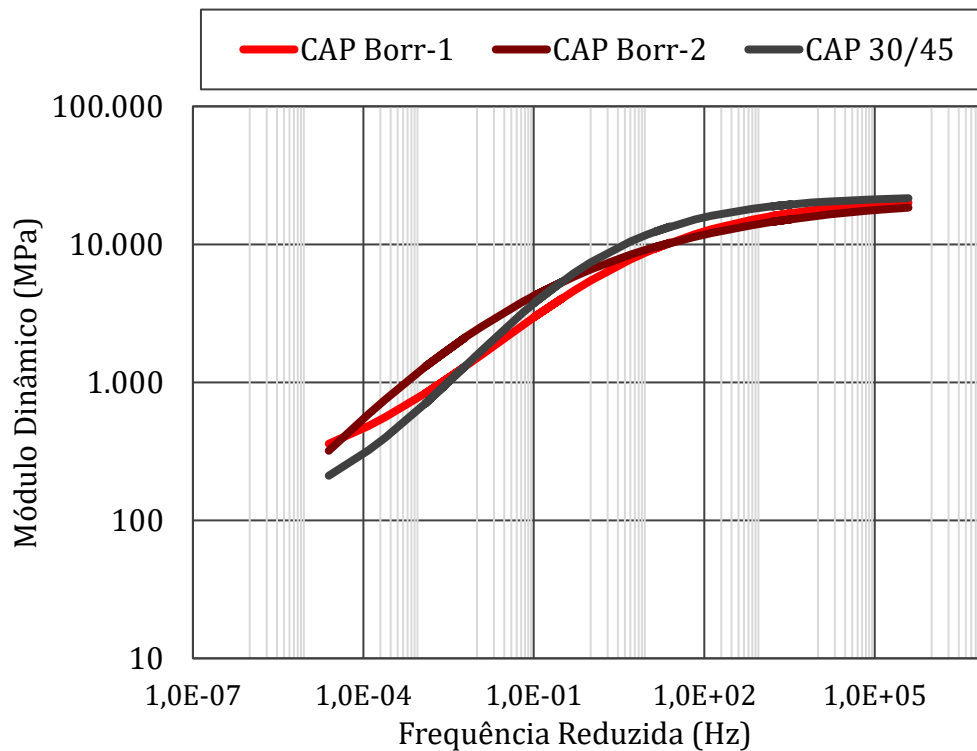


Figura 4.16: Curva mestre das misturas asfálticas EGL 9,5mm

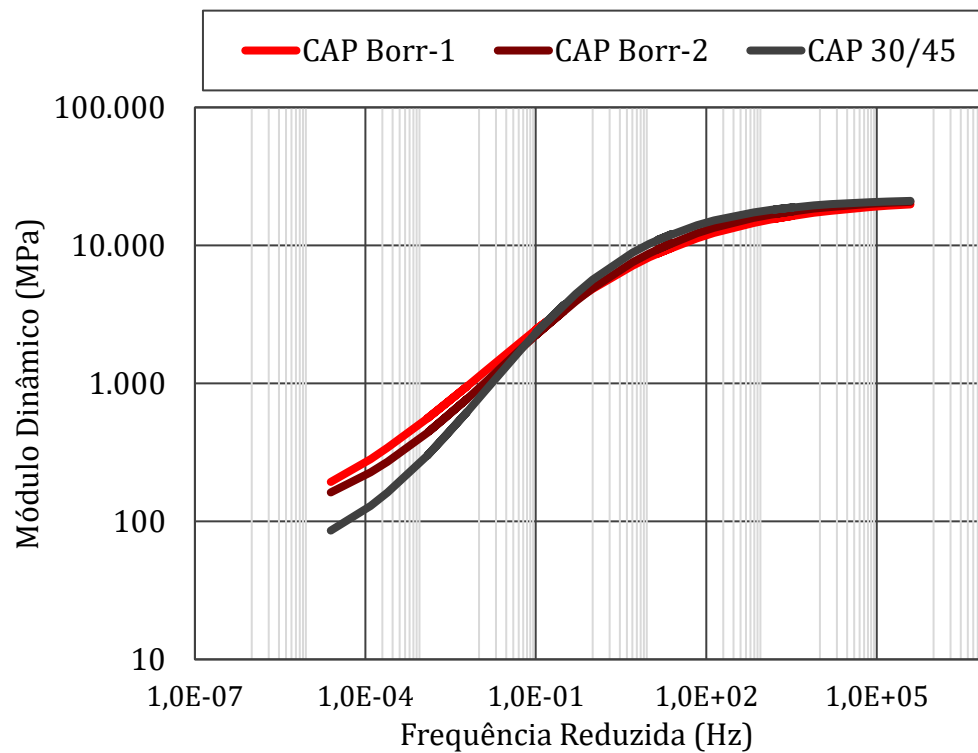


Figura 4.17: Curva mestre das misturas asfálticas Gap Graded

4.2.5. Ensaio de *Flow Number*

O ensaio de *Flow Number* (FN) foi realizado seguindo as recomendações da Norma AASHTO T 342/11, com a tensão de 600kPa e sem confinamento dos corpos de prova, na temperatura de 54,4°C. Os CPs empregados foram os mesmos utilizados no ensaio de módulo dinâmico, isto é, após finalização daquele ensaio, iniciou-se o ensaio de *flow number*. Os resultados desse ensaio são apresentados nas Tabelas 4.17, 4.18 e 4.19 para as misturas asfálticas com CAP-Borr-1, CAP-Borr-2 e CAP 30/45, respectivamente.

Tabela 4.17: Resultados do ensaio de *flow number* das misturas asfálticas com CAP-Borr-1

| Mistura | k1 | | k2 | | k3 | | k4 | |
|--|-----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| Faixa Granulométrica | Faixa III DERSA | | EGL 19mm | | EGL 9,5mm | | Gap Graded | |
| Parâmetro | Valor Médio | Desvio Padrão | Valor Médio | Desvio Padrão | Valor Médio | Desvio Padrão | Valor Médio | Desvio Padrão |
| Ponto de Fluência (Ciclos) | 2.179 | 341 | 2.482 | 156 | 2.174 | 22 | 1.096 | 22 |
| Deformação no Ponto de Fluência (microstrain) | 19.457 | 2.653 | 20.323 | 2.822 | 19.639 | 3.592 | 17.295 | 95 |
| Ciclos até obter 5% de deformação | 6.989 | 78 | 5.633 | 9 | 5.228 | 375 | 3.365 | 81 |
| ESAL Previsto até obter ATR de 12,5mm (NCHRP 691) (10 ⁶) | 132 | - | 148 | - | 132 | - | 72 | - |

 Tabela 4.18: Resultados do ensaio de *flow number* das misturas asfálticas com CAP-Borr-2

| Mistura | k5 | | k6 | | k7 | | k8 | |
|--|-----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| Faixa Granulométrica | Faixa III DERSA | | EGL 19mm | | EGL 9,5mm | | Gap Graded | |
| Parâmetro | Valor Médio | Desvio Padrão | Valor Médio | Desvio Padrão | Valor Médio | Desvio Padrão | Valor Médio | Desvio Padrão |
| Ponto de Fluência (Ciclos) | 4.185 | 371 | 6.039 | 204 | 2.130 | 287 | 1.783 | 148 |
| Deformação no Ponto de Fluência (microstrain) | 12.858 | 2.317 | 13.906 | 2.770 | 3.894 | 210 | 12.171 | 1.079 |
| Ciclos até obter 5% de deformação | 10.000 | 0 | 10.000 | 0 | 8.027 | 791 | 6.576 | 2.100 |
| ESAL Previsto até obter ATR de 12,5mm (NCHRP 691) (10 ⁶) | 233 | - | 321 | - | 129 | - | 111 | - |

Tabela 4.19: Resultados do ensaio de *flow number* das misturas asfálticas com CAP 30/45

| Faixa Granulométrica | Faixa III DERSA | | EGL 19mm | | EGL 9,5mm | | Gap Graded | |
|---|-----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| | Valor Médio | Desvio Padrão | Valor Médio | Desvio Padrão | Valor Médio | Desvio Padrão | Valor Médio | Desvio Padrão |
| Ponto de Fluência (Ciclos) | 132 | 11 | 193 | 21 | 179 | 10 | 215 | 41 |
| Deformação no Ponto de Fluência (microstrain) | 8.488 | 1.694 | 16.856 | 1.018 | 9.366 | 1.282 | 14.678 | 1.082 |
| Ciclos até obter 5% de deformação | 501 | 86 | 574 | 47 | 742 | 89 | 719 | 50 |
| ESAL Previsto até obter ATR de 12,5mm (NCHRP 691) (10⁶) | 11 | - | 16 | - | 15 | - | 17 | - |

Na Figura 4.18 são apresentados os resultados do parâmetro “Ponto de Fluência” (*Flow Number*) e pode ser notado que as misturas asfálticas com CAP-Borracha apresentaram valores muito superiores, quando comparadas com as misturas asfálticas com CAP 30/45, independente da faixa granulométrica. Esse comportamento indicaria uma maior resistência à deformação permanente nas misturas asfálticas com CAP-Borracha e também um maior número de ciclos de carregamento de veículos até atingir um mesmo afundamento de trilha de roda (ATR), quando comparado com misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos convencionais.

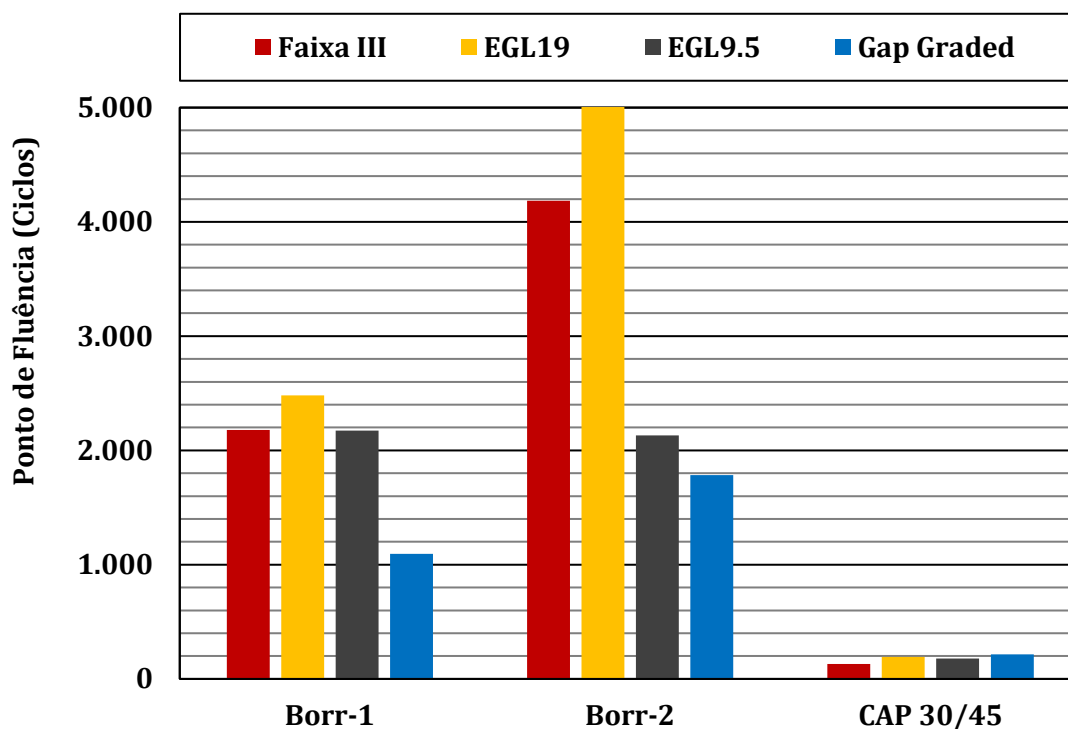


Figura 4.18: Ponto de fluência das misturas asfálticas em função da granulometria e do ligante asfáltico

Os resultados de *flow number* de todos os corpos de prova foram analisados estatisticamente por meio do software Minitab, com a ferramenta Análise de Variância (ANOVA), com o objetivo de identificar tendências e influências dos fatores avaliados. Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 4.20 e nas Figuras 4.19 e 4.20. Observa-se que os fatores CAP (A) e Granulometria (B) são significativos estatisticamente para este parâmetro, com notória influência do fator CAP (A) no parâmetro *flow number*.

Tabela 4.20: Resultados da Análise de Variância para o parâmetro *flow number*

| Fatores e Interações | Grau de Liberdade | Soma dos Quadrados | F Calculado | F Tabelado | P | Significativo |
|----------------------|-------------------|--------------------|-------------|------------|-------|---------------|
| CAP (A) | 2 | 59392016 | 539,61 | 3,52 | 0,000 | Sim |
| Granulometria (B) | 3 | 12193860 | 73,86 | 3,13 | 0,000 | Sim |
| (A)x(B) | 6 | 18910598 | 57,27 | 2,63 | 0,000 | Sim |
| Erro | 19 | 1045615 | | | | |
| Total | 30 | 84916829 | | | | |

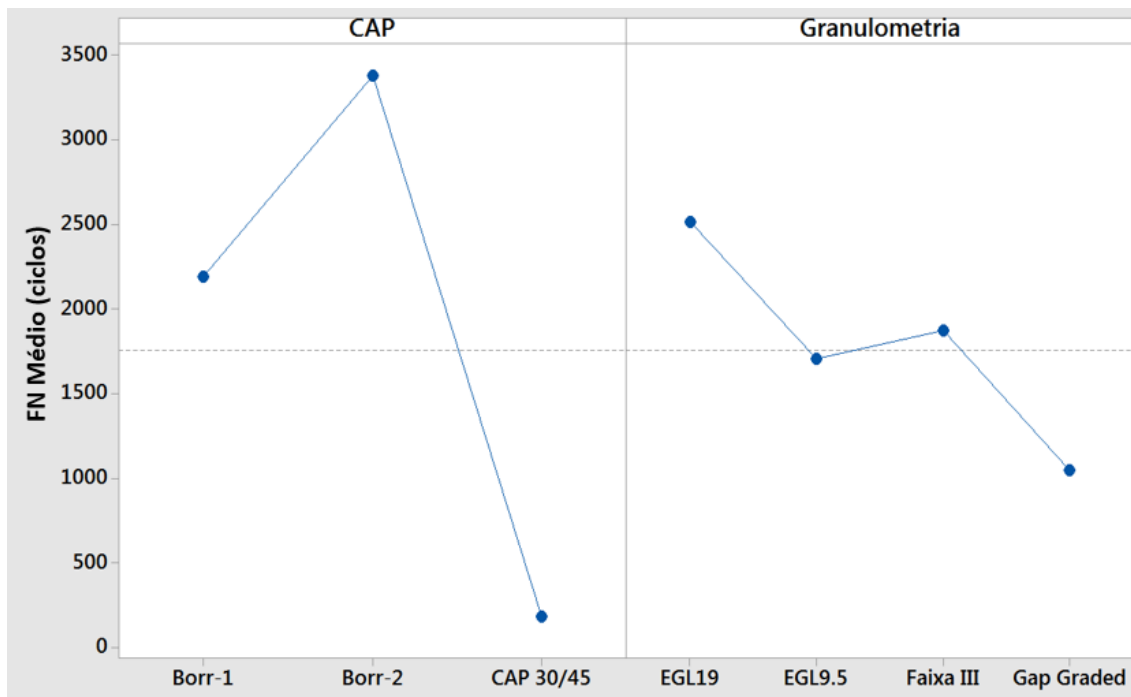


Figura 4.19: Interações individuais dos fatores CAP e Granulometria para o *flow number*

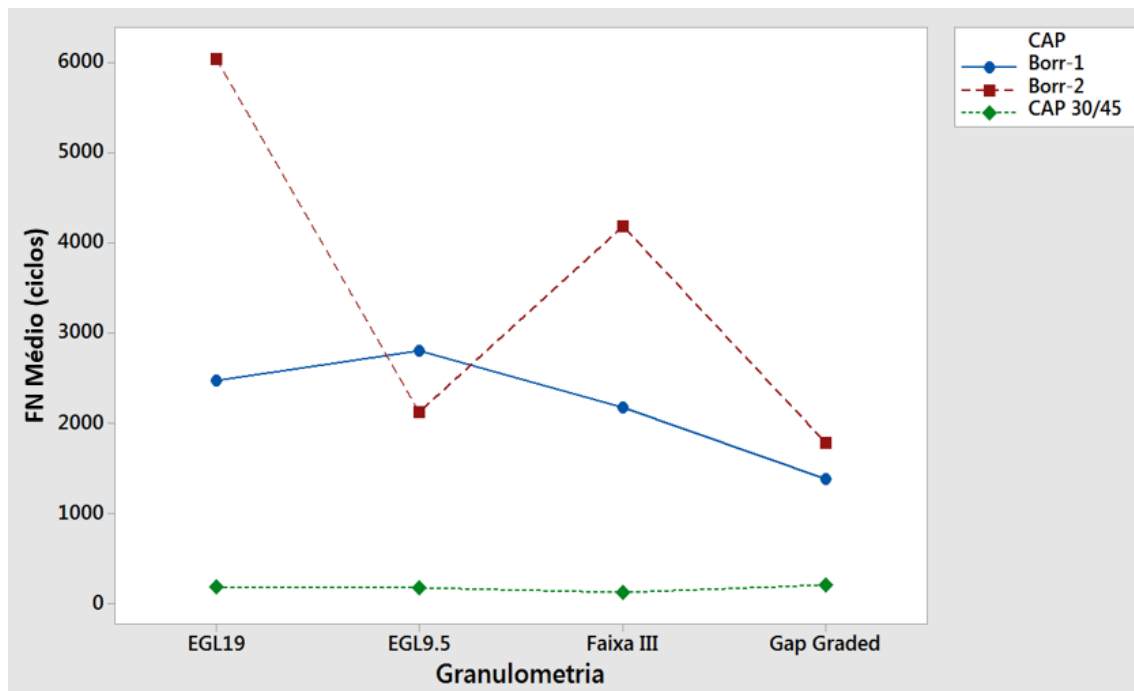


Figura 4.20: Interações combinadas dos fatores CAP e Granulometria para o *flow number*

4.2.6. Ensaio de fadiga por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos

O ensaio de fadiga foi realizado por flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos, de acordo com a AASHTO T 310-10. A temperatura utilizada para o ensaio foi de 21,0°C e a frequência foi de 10Hz. Foram moldados 12 corpos de prova prismáticos, de acordo com os parâmetros obtidos na dosagem, e com controle do volume de vazios de 4,0%, como ilustra a Figura 4.21. Os CPs foram submetidos a deformação controlada variável de 300 a 600 microstrain, e adotou-se o parâmetro de redução de 50% da rigidez inicial, como o critério de finalização do ensaio. A Figura 4.22 mostra o equipamento empregado para execução deste ensaio no Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra.



Figura 4.21: Controle do volume de vazios dos corpos de prova empregados no ensaio de fadiga

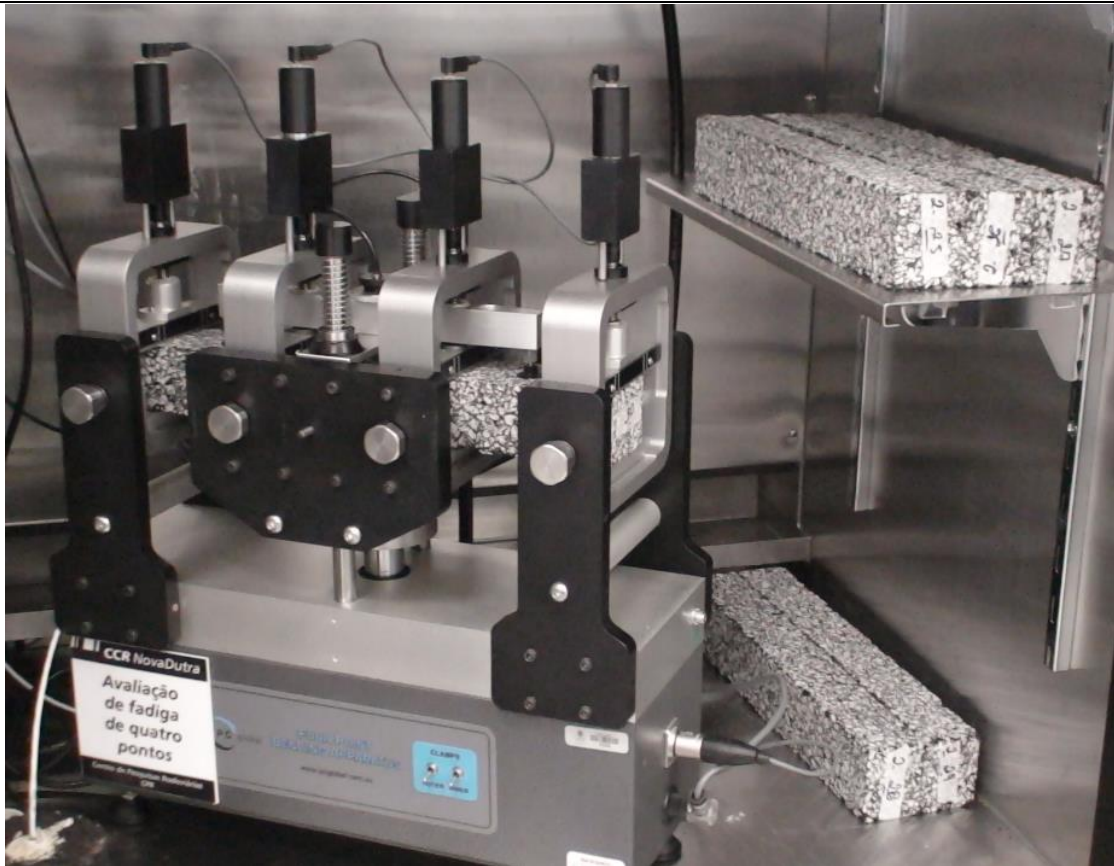


Figura 4.22: Equipamento empregado no ensaio de fadiga de misturas asfálticas

Nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 são apresentados os resultados dos ensaios de fadiga para as misturas asfálticas com CAP-Borr-1, CAP-Borr-2 e CAP 30/45, respectivamente. Nessas figuras pode-se observar que houve pouca influência da granulometria na vida de fadiga das misturas asfálticas estudadas. Apenas na Figura 4.24 observa-se um deslocamento para a esquerda mais pronunciado da mistura asfáltica EGL 19 com CAP-Borr-2.

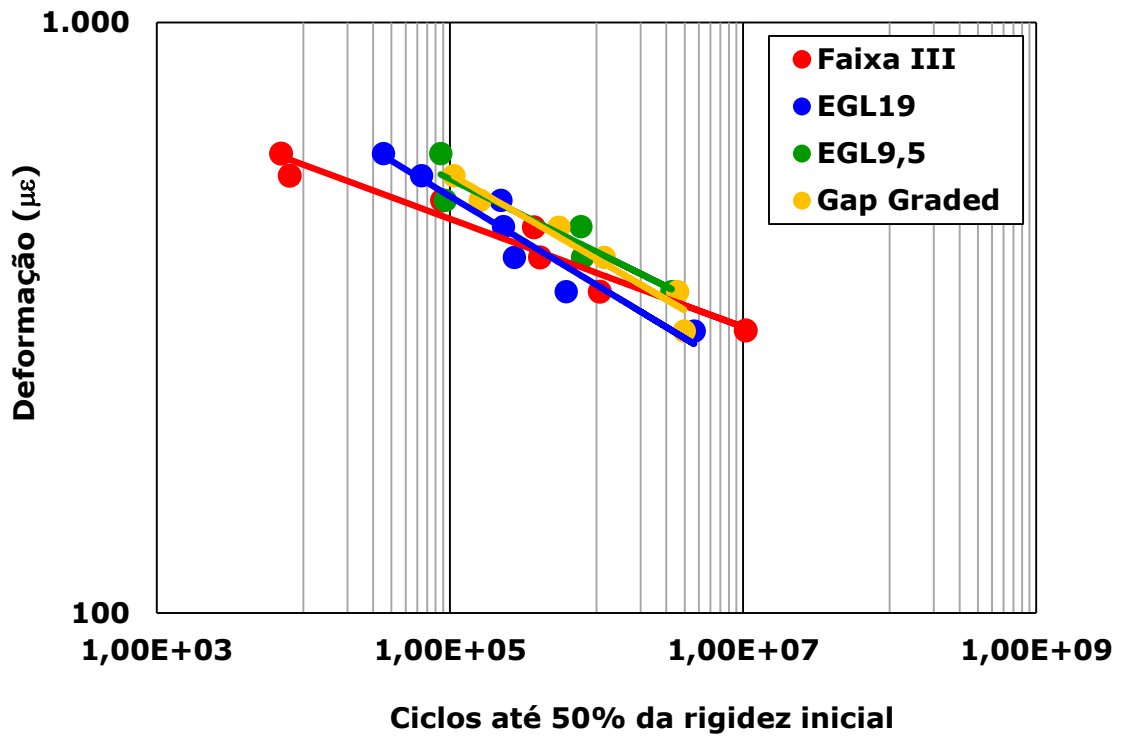


Figura 4.23: Resultados do ensaio de fadiga nas misturas asfálticas com CAP-Borr-1

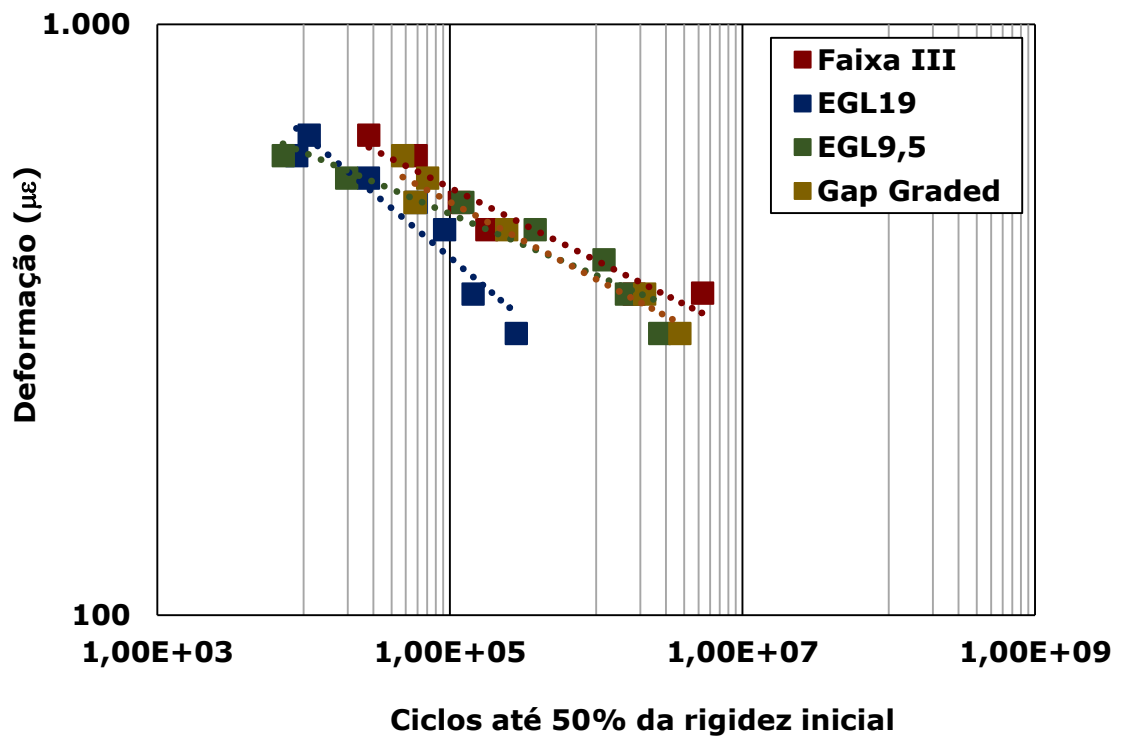


Figura 4.24: Resultados do ensaio de fadiga nas misturas asfálticas com CAP-Borr-2

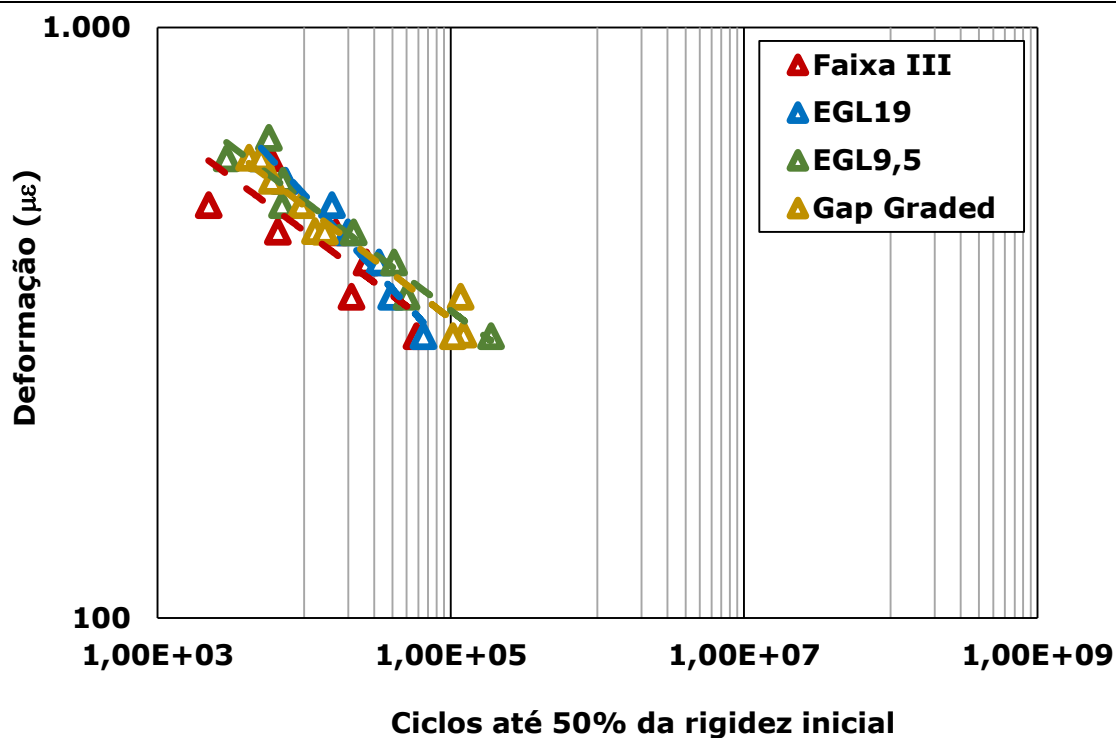


Figura 4.25: Resultados do ensaio de fadiga nas misturas asfálticas com CAP 30/45

As Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 foram construídas para visualizar o efeito do tipo de ligante asfáltico em cada uma das quatro faixas granulométricas estudadas, Faixa III, EGL19, EGL9,5 e *Gap Graded*. Observa-se em todas as figuras um deslocamento para a direita das curvas de fadiga das misturas asfálticas com CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2, com relação àquelas misturas com CAP 30/45. Esse comportamento indica a resistência à fadiga superior das misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por borracha moída de pneus, conforme também é relatado nas referências bibliográficas consultadas.

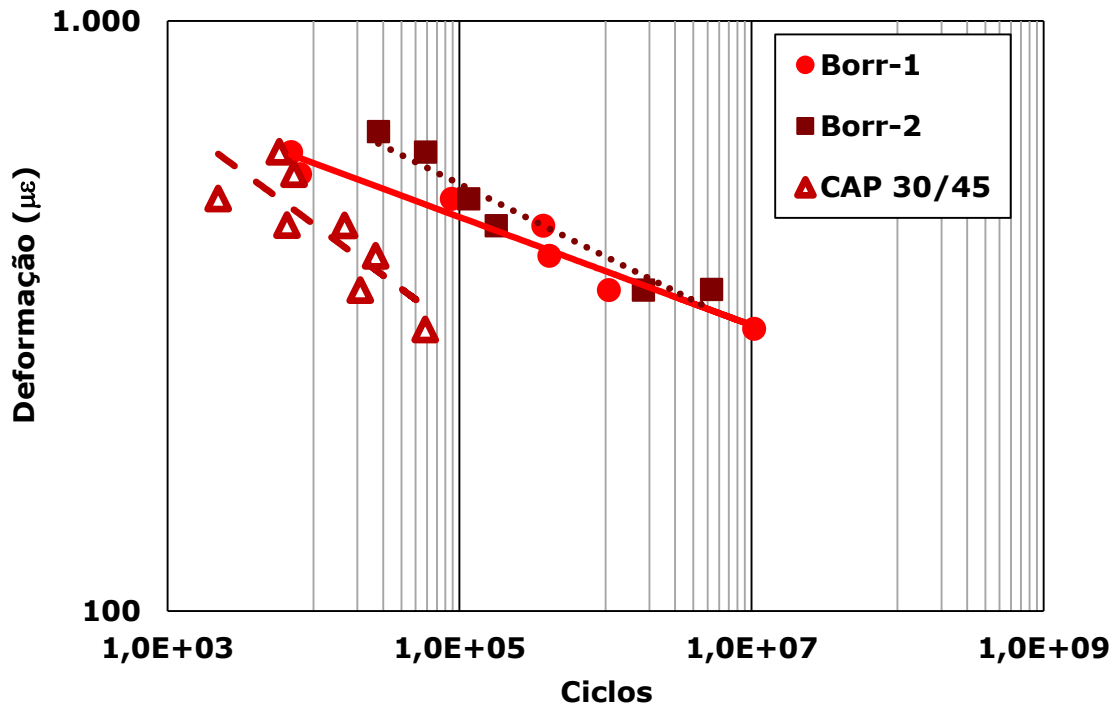


Figura 4.26: Resultados do ensaio de fadiga nas misturas asfálticas de granulometria Faixa III

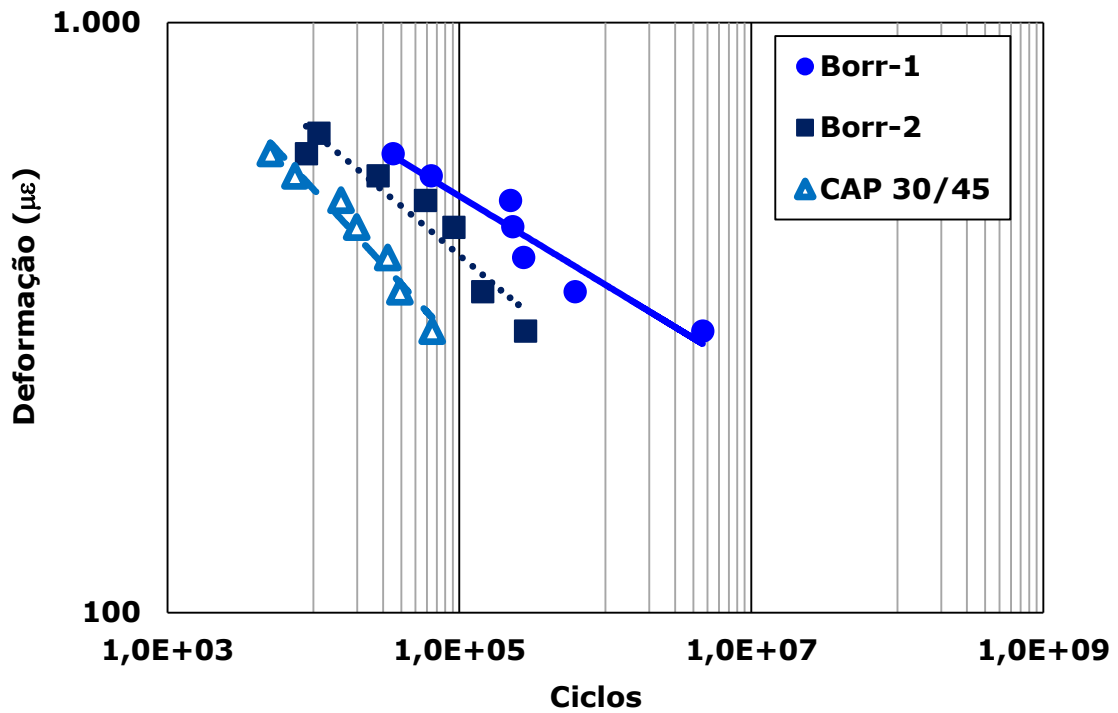


Figura 4.27: Resultados do ensaio de fadiga nas misturas asfálticas de granulometria EGL 19

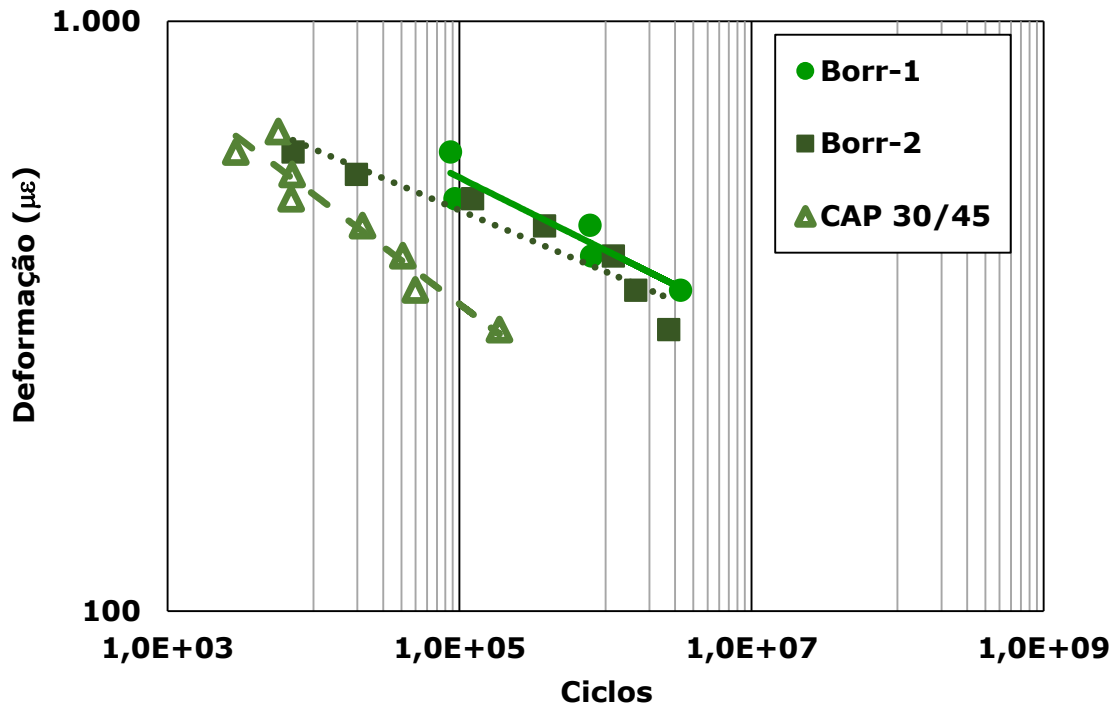


Figura 4.28: Resultados do ensaio de fadiga nas misturas asfálticas de granulometria EGL 9,5

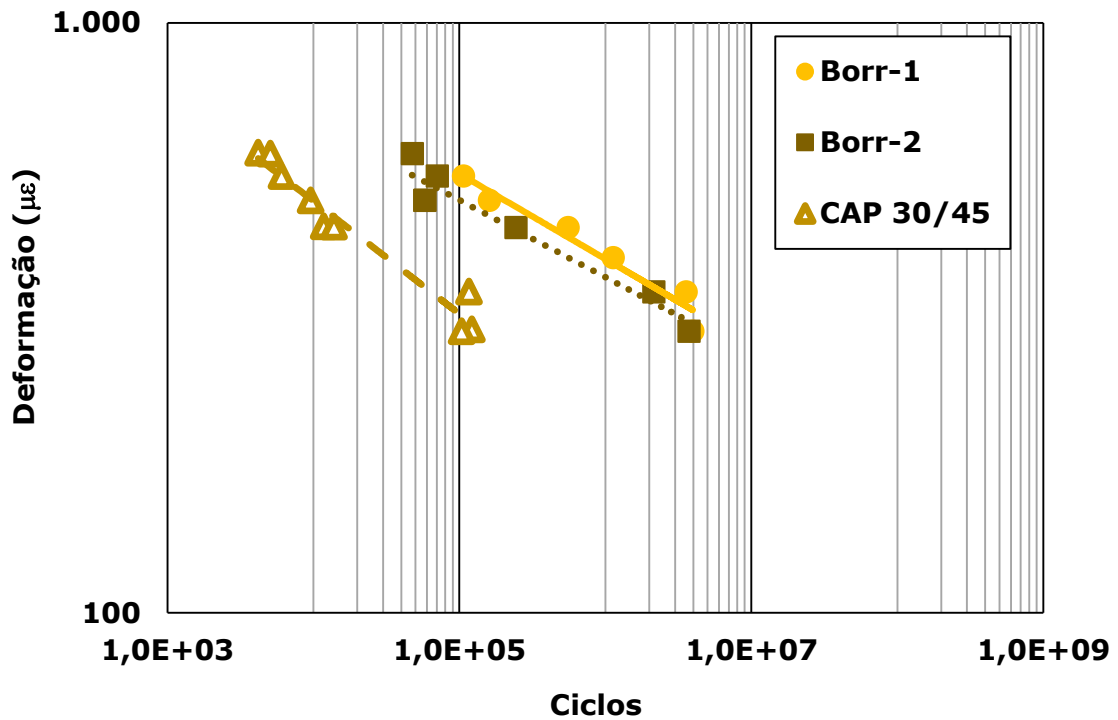


Figura 4.29: Resultados do ensaio de fadiga nas misturas asfálticas de granulometria Gap Graded

Os resultados obtidos no ensaio de fadiga usualmente são utilizados para construir modelos que facilitam desenvolver comparativos acerca do comportamento de fadiga de distintas misturas

asfálticas. Os resultados desses modelos são apresentados na Tabelas 4.21, 4.22 e 4.23, para as misturas asfálticas com CAP-Borr1, CAP-Borr2 e CAP 30/45, respectivamente.

Tabela 4.21: Resultados do ensaio de fadiga nas misturas asfálticas com CAP-Borr-1

| Mistura | | k1 | k2 | k3 | k4 |
|--|------------------------------|-----------------|----------|-----------|------------|
| Faixa Granulométrica | | Faixa III DERSA | EGL 19mm | EGL 9,5mm | Gap Graded |
| Na Deformação de 300 $\mu\epsilon$ | Módulo Rigidez Inicial (MPa) | 6.096 | 8.022 | 6.018 | 4.040 |
| | Módulo Rigidez Final (MPa) | 3.024 | 4.930 | 2.556 | 188 |
| | Ângulo de Fase Inicial (°) | 21 | 20 | 24 | 27 |
| | Ângulo de Fase Final (°) | 23 | 26 | 25 | 45 |
| Número de Ciclos para 200 $\mu\epsilon$ | | 6,2E+08 | 3,2E+07 | 1,4E+08 | 9,0E+07 |
| Deformação ($\mu\epsilon$) para 10 ⁶ ciclos | | 373 | 353 | 403 | 397 |

Tabela 4.22: Resultados do ensaio de fadiga nas misturas asfálticas com CAP-Borr-2

| Mistura | | k5 | k6 | k7 | k8 |
|--|------------------------------|-----------------|----------|-----------|------------|
| Faixa Granulométrica | | Faixa III DERSA | EGL 19mm | EGL 9,5mm | Gap Graded |
| Na Deformação de 300 $\mu\epsilon$ | Módulo Rigidez Inicial (MPa) | 6.269 | 7.409 | 5.023 | 5.424 |
| | Módulo Rigidez Final (MPa) | 3.130 | 3.698 | 2.507 | 2.708 |
| | Ângulo de Fase Inicial (°) | 22 | 21 | 24 | 23 |
| | Ângulo de Fase Final (°) | 37 | 30 | 29 | 31 |
| Número de Ciclos para 200 $\mu\epsilon$ | | 1,6E+08 | 2,0E+06 | 2,1E+08 | 7,5E+07 |
| Deformação ($\mu\epsilon$) para 10 ⁶ ciclos | | 393 | 235 | 370 | 365 |

Tabela 4.23: Resultados do ensaio de fadiga nas misturas asfálticas com CAP 30/45

| Mistura | | k9 | k10 | k11 | k12 |
|--|---------------------------------|-----------------|----------|-----------|------------|
| Faixa Granulométrica | | Faixa III DERSA | EGL 19mm | EGL 9,5mm | Gap Graded |
| Na Deformação de 300 $\mu\epsilon$ | Módulo Rigidez Inicial (MPa) | 11.492 | 11.504 | 12.257 | 11.653 |
| | Módulo Rigidez Final (MPa) | 5.737 | 5.727 | 6.124 | 5.796 |
| | Ângulo de Fase Inicial (°) | 17 | 17 | 15 | 18 |
| | Ângulo de Fase Final (°) | 20 | 21 | 20 | 24 |
| Número de Ciclos para 200 $\mu\epsilon$ | | 1,8E+05 | 3,2E+05 | 1,1E+06 | 9,8E+05 |
| Deformação ($\mu\epsilon$) para 10 ⁶ ciclos | | 114 | 146 | 203 | 199 |

Para analisar os resultados do ensaio de flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos, a partir dos modelos obtidos, pode-se fixar o número de ciclos em 10^6 e determinar a deformação correspondente para este nível de carregamento, sendo que os valores mais elevados indicam uma mistura asfáltica mais resistente à fadiga. Nas Tabelas 4.21 a 4.23 são apresentados também esses resultados e na Figura 4.30 também são mostrados esses resultados, agrupados de acordo ao ligante asfáltico empregado. Observa-se que nas misturas asfálticas com CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2 obtiveram-se valores de deformação superiores a 200 *microstrain*, enquanto que para as misturas asfálticas com CAP 30/45, as deformações foram inferiores a 200 *microstrain*. Essa análise também constata a superioridade das misturas asfálticas com CAP-Borracha para resistir ao trincamento por fadiga, quando comparadas com misturas asfálticas convencionais.

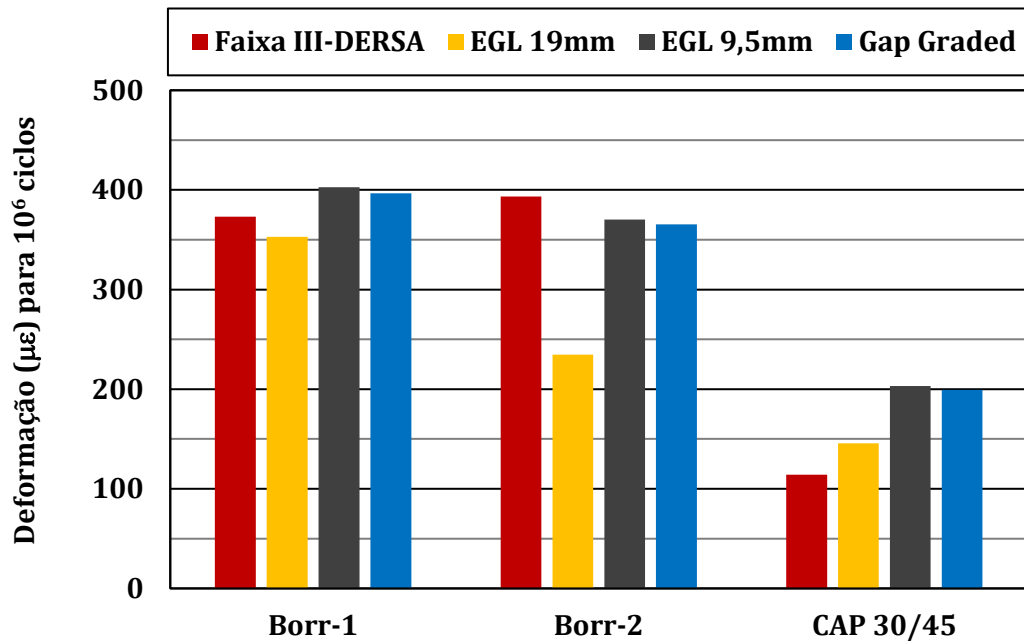


Figura 4.30: Resultados de deformação para o carregamento de 10^6 ciclos nas misturas asfálticas

Na Tabelas 4.21 a 4.23 apresentam-se também outros parâmetros determinados no ensaio de fadiga. O parâmetro de rigidez flexural é calculado continuamente durante todo o ensaio, sendo este o parâmetro utilizado para determinar o início de microtrincas na mistura asfáltica. Na Figura 4.31 são apresentados os resultados da rigidez flexural no ciclo de número 50, considerada como a rigidez inicial do ensaio. Observa-se que as misturas asfálticas com CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2 apresentam rigidez inferior, quando comparada com as misturas asfálticas com CAP 30/45. Esse comportamento pode ser atribuído ao maior teor de ligante asfáltico que as misturas com CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2 têm, que por sua vez conduzem a maiores vidas de fadiga, como foi afirmado anteriormente.

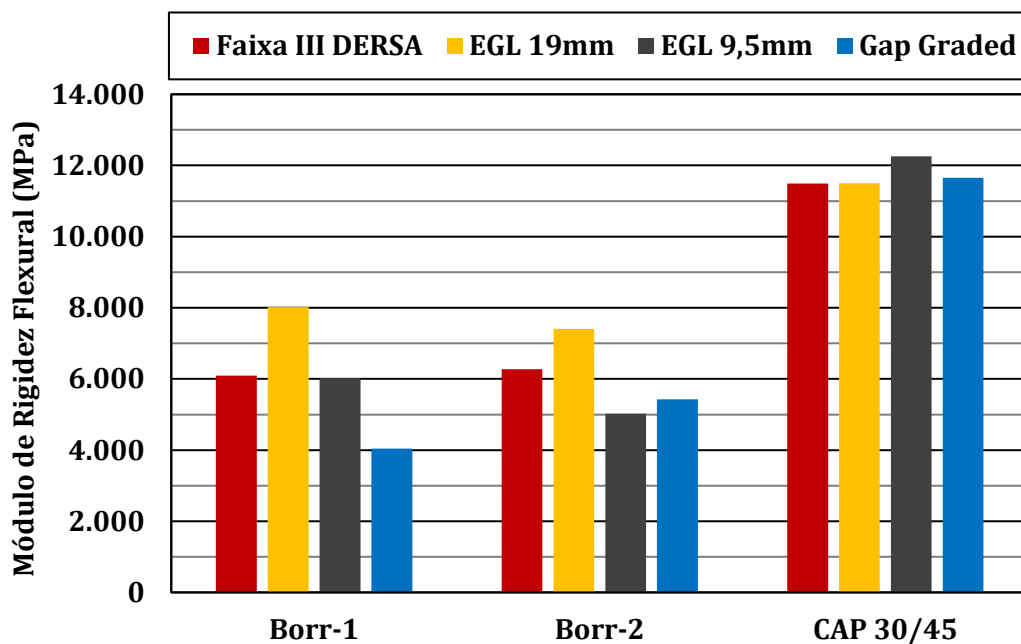


Figura 4.31: Rigidez flexural inicial das misturas asfálticas no ensaio de fadiga

Durante o ensaio de flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos também é determinado o ângulo de fase das misturas asfálticas, que é um indicativo do comportamento das misturas asfálticas, sendo que valores próximos a 0° indicam materiais com comportamento mais elástico, enquanto que valores próximos a 90° estão associados a materiais de comportamento mais viscoso. Na Figura 4.32 apresentam-se os resultados de ângulo de fase obtidos nos ensaios de fadiga realizados nas misturas asfálticas. Observam-se maiores ângulos de fase para as misturas asfálticas com CAP 30/45, quando comparadas com as misturas com CAP-Borr-1 e CAP-Borr-2. Esse comportamento poderia ser atribuído ao menor teor de ligante asfáltico das misturas asfálticas com CAP 30/45, fazendo com que os agregados minerais tenham maior influência no comportamento mecânico.

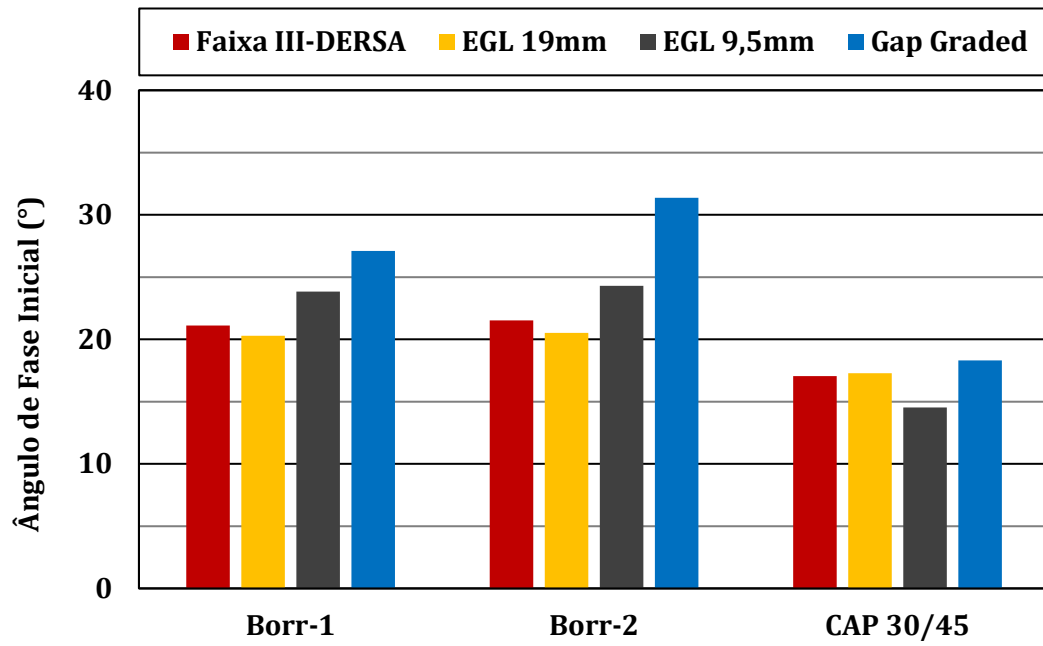


Figura 4.32: Ângulo de fase inicial das misturas asfálticas no ensaio de fadiga

5. CONCLUSÕES

O asfalto modificado por borracha moída de pneus é utilizado há décadas em diferentes partes do mundo para produzir misturas asfálticas com características mecânicas superiores às das misturas asfálticas convencionais. A experiência e monitoramento de segmentos de rodovias construídos com esta técnica têm demonstrado que seu uso melhora a durabilidade e o comportamento mecânico dos pavimentos de forma geral.

Um dos objetivos deste estudo foi desenvolver uma revisão bibliográfica acerca das técnicas utilizadas para empregar o asfalto borracha na pavimentação de rodovias e também sobre os benefícios quanto ao comportamento mecânico e desempenho. Para verificação desses benefícios, nesta pesquisa foi desenvolvido um programa laboratorial para analisar o asfalto modificado por borracha, em nível de ligante asfáltico por meio de ensaios empíricos tradicionais e ensaios reológicos e em nível de misturas asfálticas, por meio de ensaios de caracterização mecânica.

Durante a revisão bibliográfica constatou-se que a técnica do asfalto borracha tem evoluído constantemente, na busca do seu aperfeiçoamento para potencializar os benefícios mecânicos nos pavimentos asfálticos. É certo que ainda existem desafios que devem ser vencidos, como por exemplo, os cuidados precisos que devem ser adotados para poder produzir o asfalto borracha sem riscos de separação das fases. Para mitigar estes riscos, o emprego de tanques verticais com sistemas de agitação é uma medida que deveria ser mandatória para o emprego do asfalto borracha no país.

No programa laboratorial, em nível de ligantes asfálticos, foram coletados quatro asfaltos borrachas disponíveis no mercado nacional, para serem avaliados por meio de ensaios empíricos tradicionais e ensaios reológicos. Também foram incluídos neste programa laboratorial, o CAP 50/70 e o CAP 30/45, bastante utilizados nas atividades de pavimentação no país, para efeitos comparativos. As observações realizadas nos resultados desses ensaios estão apresentadas na Tabela 5.1. De forma geral, observa-se que o asfalto borracha apresenta melhores características que os asfaltos convencionais, indicando um melhor desempenho quando utilizado na produção de misturas asfálticas para pavimentos.

Tabela 5.1: Comparativo das características do asfalto borracha com o CAP 50/70 e com o CAP 30/45 em nível de ligante asfáltico

| Ensaio | Parâmetro | Comparativo com o CAP 50/70 | Comparativo com o CAP 30/45 |
|-------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Empíricos | Ponto de Amolecimento | Maior | Maior |
| | Penetração | Inferior | Similar |
| | Viscosidade | Maior | Maior |
| | Retorno Elástico | Maior | Maior |
| Reológicos | Módulo Complexo | Maior | Maior |
| | Ângulo de fase | Menor | Menor |
| | Grau de Desempenho (PG) | Maior | Maior |
| | Recuperação Elástica | Maior | Maior |
| | Compilância não-recuperável (Jnr) | Menor | Menor |
| | Temperatura Crítica à Fadiga | Menor | Menor |

O programa laboratorial executado em nível de misturas asfálticas empregou dois dos asfaltos borracha coletados e o CAP 30/45. As granulometrias selecionadas para produzir as misturas asfálticas foram a Faixa III do DERSA, EGL 19mm, EGL 9,5mm e *Gap Graded* de 9,5mm. Os ensaios foram selecionados para determinar em laboratório os parâmetros mecânicos e de desempenho das misturas asfálticas. Na Tabela 5.2 são apresentados as principais observações realizadas nos resultados dos ensaios executados e nota-se, de forma geral, que as misturas asfálticas produzidas com asfalto borracha apresentam comportamento mecânico e de desempenho superior, quando comparadas com as misturas asfálticas com CAP 30/45.

Tabela 5.2: Comparativo das características do asfalto borracha com o CAP 30/45 em nível de concreto asfáltico

| Parâmetro | Comparativo com o CAP 30/45 |
|--|------------------------------------|
| Resistência à Tração | Similar |
| Dano por umidade induzida | Similar |
| Módulo de Resiliência | Menor |
| Módulo Dinâmico em temperaturas baixas ou frequências elevadas | Similar |
| Módulo Dinâmico em temperaturas intermediárias ou frequências intermediárias | Menor |
| Módulo Dinâmico em temperaturas elevadas ou frequências elevadas | Maior |
| Flow Number | Maior |
| Fadiga | Maior |
| Módulo Flexural no ensaio de fadiga | Menor |
| Deformação para carregamento de 10^6 ciclos | Maior |

Tanto a revisão bibliográfica como os programas laboratoriais executados neste estudo comprovaram os benefícios mecânicos de empregar o asfalto modificado por borracha na pavimentação asfáltica. Nas misturas asfálticas com asfalto borracha destacaram-se as características de resistência ao trincamento por fadiga e à deformação permanente, quando comparadas com as misturas asfálticas convencionais.

De forma complementar, acredita-se que com os cuidados necessários, um adequado controle de qualidade e o investimento em educação e treinamento das equipes técnicas envolvidas na pavimentação asfáltica, pode se obter o máximo benefício da aplicação do asfalto borracha.

Conclui-se que é uma técnica do asfalto borracha que deveria ser considerada com maior frequência nos projetos de novos pavimentos, para obter rodovias com desempenho superior, mais duráveis e resistentes ao tráfego e às condições climáticas durante maiores períodos de tempo e, portanto, com menores intervenções de manutenção, trazendo maior conforto, segurança e economia para os usuários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelrahman, M.A.; Carpenter, S. H. (1999). *Mechanism of interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier*. Transportation Research Record, Washington, D.C. n. 1661, p 106-113.
- Ali, A. H.; Mashaan, N.S.; Karim, M.R. (2013). *Investigations of physical and rheological properties of aged rubberised bitumen*. Em: Advances in Materials Science and Engineering. v.2013, p.239.
- ANIP (2017). *Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos*. http://www.anip.com.br/arquivos/producao_vendas.pdf. Acesso em 06/12/2017.
- ARCO, Patente No. 4.068.023, Janeiro, 1978.
- Asphalt Academy. (2007). *The use of Modified Bituminous Binders in Road Construction*. Technical Guideline of the South African Asphalt Academy. TG1. República da África do Sul.
- Austroroads. (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. (2012). *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.
- BATISTA, F.; ANTUNES, M. L. E FONSECA, P. (2006). *Desempenho de Misturas Betuminosas com BMB Aplicadas em Portugal*. Actas do IV Congresso Rodoviário Português "Estrada 2006", CD Ed., 69.pdf, p1-10. Estoril, Portugal.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA; CERTATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2008). *Pavimentação asfáltica*. Livro. PETROBRAS: ABEDA. Rio de Janeiro, RJ.
- 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.
- BERTOLLO, S. A. M. (2002). *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.

- Billiter, T.C.; Davison, R.; Glover, C.; Bullin, J. (1997). *Production of Asphalt-Rubber Binders in High-Cure Conditions*. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board 1586(1):50-56. Washington D.C. Estados Unidos.
- Boulding, M. G.; Collins, J. H.; Berker, A. (1991). *Rheology and Microstructure of Polymer/Asphalt Blends*. Rubber Chemistry and Technology, Easton, v.64, n.4, p.577-600.
- CALTRANS. (2011). State of California Department of Transportation. *Performance survey of rubberized hot mix asphalt projects*. Report. Sacramento, CA, Estados Unidos.
- CALTRANS. (2003). State of California Department of Transportation. *Asphalt Rubber Usage Guide*. Sacramento, Califórnia, Estados Unidos.
- CAMARGO, F. F. (2016). *Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- DNIT 111/20019-EM. Pavimentação Flexível – Cimento Asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de Material. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro.
- DNIT 112/20019-ES. Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de Serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro.
- Domingos, M. D. I. e Faxina, A. L. (2015). *Ensaio MSCR segundo as normas ASTM D7 405-10^a e AASHTO T350-14: Um estudo de caso envolvendo ligantes asfalto-borracha*. Em: Anais do XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Ouro Preto, MG.
- DOMINGOS, M.D.I. (2011). *Caracterização do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- EPPS, J. A. (1994). *Uses of Recycled Rubber Tires in Highways*. NCHRP SYNTHESIS 198. Transportation Research Board. Washington, D.C. Estados Unidos.
- ETRMA (2011). European Tyre and Rubber Manufacturers Association. *End of Life Tyres: A Valuable resource with growing potential*. Edição de 2011. Pp. 22.
- Fager, G. A. (1994). *Use of rubber in asphalt pavement: Kansas experience*. Em: Transportation Research Record. Washington D.C., n.1436, p.88-97.

- Faxina, A. L. (2002). 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.
- FAXINA, A. L. (2006). *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.
- FHWA(2016). <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/st3.cfm> Acessado em 11/05/2016.
- FHWA. (2017). User Guidelines for Waste and Buproduct Materials in Pavement Construction. Relatório da Federal Highway Administration. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/st2.cfm>. Acessado em: 22/03/2017.
- HASSAN, N. A. (2012). *Microstructural characterisation of rubber modified asphalt mixtures*. Tese de Doutorado. Universidade de Nottingham. Nottingham, Reino Unido.
- Heitzman, M. (1992). *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.
- Hines, S. (2007). *Crumb Rubber Test Section on CSNHS-M003-00(560) 01 Houston Peach*. Special Research Report No. 2007-1. Georgia Department of Transportation. Estados Unidos.
- Hirsch, F. (2009). *Avaliação das propriedades de fratura de misturas asfálticas através de ensaio de tração em disco circular com fenda*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Jensen, W. e Abdelrahman, M. (2006). *Crumb rubber in performance-graded asphalt binder*. Final Report. SPR-0105. Nebraska Department of Roads, University of Nebraska, Lincoln. Estados Unidos.
- Jung, J.; Kaloush, K.E.; Way, G.B. (2003). *Life cycle cost analysis: conventional versus asphalt rubber pavements*. Em: Rubber Pavement Association, 2002 Edition.
- 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.

- Larsen, P. (1989). *Eight-year performance evaluation of an asphalt rubber hot mix pavement*. Em: National Seminar on Asphalt Rubber. Kansas City, Proceedings. Estados Unidos.
- Lee, S-J.; Amirkhanian, S.N.; Shatanawi, K. (2006). Effect of Crumb Rubber on the Aging of Asphalt Binders. Em: Asphalt Rubber Proceedings 2006. Palm Springs, Califórnia, Estados Unidos.
- Leite, L. F. M. (1999). Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Liang, R. Y. e Lee, S. (1996). *Short-term and long-term aging behavior of rubber modified asphalt paving mixtures*. Em: Transportation Research Record. Washington D.C., n. 1530, p. 10-17.
- LO PRESTI, D. (2013). *Recycled Tire Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review*. Construction and Building Materials Journal. Volume 49, Pp. 863-881. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007)
- Loeber, L.; Muller, G.; Morel, J.; Sutton, O. (1998). *Bitumen in colloid science: a chemical, structural and rheological approach*. Em: Fuel. 77(13): 1443-1450.
- Mahrez, A. e Rehan, M. (2003). *Rheological evaluation of aging properties of crumb rubber-modified bitumen*. Em: Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studied. v.5, p 820-833.
- Mashaan, N. S.; Ali, A. H.; Karim, M. R.; Abdelaziz, M. (2014). A review on using crum rubber in reinforcement of asphalt pavement. Em: Scientific World Journal. DOI: 10.1155/2014/214612.
- Mashaan, N.S. e Karim M. R. (2013). *Investigating rheological properties of crumb rubber modified bitumen and its correlation with temperature susceptibility*. Materials Research. 2013; 16(1): 116-127.
- MCDONALD, Charles, Patent No. 4.085.078, Abril de 1978.
- MICHELLIN (2016). <http://www.michelin.com.br/transportes-profissionais-otr/tudo-sobre-agricolas/mais-info/Bons-motivos-para-escolher-o-pneu-Radial.html>. Acesso em 10/05/2016
- Miknis, F.P. e Michon, L.C. (1998) *Some applications of nuclear magnetic resonance imaging to crumb rubber modified asphalts*. Em: Fuel. 77(5): 393-397.
- Morilha Junior, A. (2004). 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.

- Natu, G.S.; Tayebali, A.A. (1999). *Mixture design and accelerated laboratory performance evaluation of unmodified and crumb rubber modified mixtures*. Em: Association of Asphalt Paving Technologists. v.68, p.192-221.
- 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. 89(1-3): 53-61.
- Navarro, F.J. (2004). *Thermo-rheological behavior and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens*. Em: Fuel, Guilford, v..83, n. 14/15, p.2041-2049.
- Navarro, F.J.; Partal, P.; García-Morales, M. (2009). *Bitumen modification with reactive and non-reactive (virgin and recycled) polymers: a comparative analysis*. Em: Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 15(4):458-464.
- NEVES FILHO, C.L.D. (2004). Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas SMA Produzidas com Ligante Asfalto-Borracha. 2004. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes (São Carlos) – Universidade
- ODA, S. (2000). *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.
- ODA, S.; FERNANDES JR, J. L. (2001). Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação. Acta Scientiarum (UEM), Maringá, PR, v. 23, p. 1589-1597.
- ODA, S.; FERNANDES JR, J. L. (2000). Resultados da avaliação de asfalto-borracha através de ensaios tradicionais e de ensaios da especificação SUPERPAVE. In: José Reynaldo Anselmo Setti; Helena Beatriz Bettella Cybis. (Org.). Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes. 1ed.Rio de Janeiro, RJ: ANPET, 2000, v. 1, p. 577-589.
- OLIVER, J. W. H. (1981). *Modification of paving asphalts by digestion with scrap rubber*. Transportation Research Record 821. Transportation Research Board, Washington, D.C. Estados Unidos.
- Peterson, J.C. (1984). *Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: state of the art*. Em: Transportation Research Record. n. 999; p. 13-30.

- PILATI, F. (2008). 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.
- PINHEIRO, J. H. M.; SOARES, J. B.; LEITE, L. M. (2003). Caracterização de misturas asfálticas com Borracha produzidas pelos processos úmido e seco. Em: Anais do 17º Congresso de pesquisa e ensino de transportes, ANPET. Rio de Janeiro.
- Raad, L. e Saboundjian, S.; Corcoran, J. *Remaining fatigue life analysis: a comparison between conventional dense-graded asphalt concrete and gap-graded asphalt rubber hot mix*. Transportation Research Record. Washington D.C. n. 1388, 1993. Estados Unidos.
- Read, J.M. e Whiteoak, C.D. (2003). *The Shell Bitumen Handbook*. 5ª Edição. Londres, Reino Unido, Thomas Telford Publishing.
- RESCHNER, K. (2008). *Scrap tire recycling: A summary of prevalent disposal and recycling methods*. PP. 16. <http://www.entire-engineering.de/Scrap Tire Recycling.pdf>
- Robertson, R. E. (1991). *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.
- Saboundjian, S.; Saad, L. (1997). *Performance of rubberized asphalt mix in Alaska*. Em: Transportation Research Record, Washington D.C. n. 1583, p. 52-62.
- SANDBERG, U. (2010). *Asphalt rubber pavements in Sweden – Noise and rolling resistance properties*. Em: Inter Noise Congress. Lisboa, Portugal.
- SHATANAWI, K. M. (2008). *The Effects of Crumb Rubber Particles on Highway Noise Reduction – A Laboratory Study*. Tese de Doutorado. Clemson University. Carolina do Sul. Estados Unidos.
- SHEN, J.; XIE, Z.; LI, B. (2014). *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.
- Shen, J.; Amirkhanian, S.; Xiao, F.; Tang, B. (2009). *Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders*. Em: Construction and Building Materials. 23(1):304-310.

- Shen, J.; Zhaoxing, X.; Li, B. (2014). *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. Georgia, Estados Unidos.
- Shuler, S. (2011). *Use of waste Tires (Crumb Rubber) on Colorado Highways*. Report No. CDOT-2011-4. Interim Report. Colorado Department of Transportation. Colorado, Estados Unidos.
- Sousa, J. B.; Fonseca, P.; Freire, A.; Pais, J. *Comparação da vida à fadiga e deformação permanente entre misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus convencionais*. Relatório Consulpav EST 99-07. Portugal, 1999.
- SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. . *Asfalto Borracha e Borracha Agregado: Possibilidades de Utilização de Borracha Reciclada em Misturas Asfálticas*. Revista Estradas (Porto Alegre), Porto Alegre, v. 4, n.junho 2003, p.
- Specht, L.P. (2004). *Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- STEPHEN, L. R. (1993). *Fundamental principles of polymeric materials (2nd edition)*. Canada: Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc.
- Thodesen, C.; Biro, S.; Kay, J. (2009). *Evaluation of current modified asphalt binders using the multiple stress creep recovery test*. Em: Proceedings of AR2009 conference. Nanjing, China.
- VELOSO, Z. M. F. (2010). *Ciclo de vida dos pneus*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, D.F.
- Way, G. B. (2000). *Where the rubber meets the rubber: 12 years of durable succes*. Em: Asphalt Rubber 2000, Vilamoura. Proceedings. p.15-32. Estados Unidos.
- WAY, G. B. (2012). *Asphalt-Rubber 45 Years of Progress*. Em: Proceedings Asphalt Rubber Conference. Munique. Alemanha.
- WAY, G. B.; KALOUSH, K. E.; BILIGIRI, K. P. (2011). *Asphalt Rubber Standard Practice Guide*. First Edition. Final Report. 121pp. Rubber Pavements Association. Arizona, Estados Unidos.
- Zaman, A. A.; Fricke, A.L.; Beatty, C.L. (1995). *Rheological properties of rubber-modified asphalt*. Em: Journal of Transportation Engineering. v.121(6):461-467.
- Zanzotto, K.; Kennepohl, G.J. (1996). *Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt*. Transportation Research Record, Washington, D.C. n. 1530, p. 51-58.

Zhou, H.; Holikatti, S.; Vacura, P. (2014). Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review. Em: Journal of Traffic and Transportation Engineering. Vol. 1(1), pp: 39-48.