



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DE MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM
BORRACHA DE PNEUS PELO PROCESSO SECO

ROBERTA DE CARVALHO BARBOSA

João Pessoa – PB
Novembro de 2016

ROBERTA DE CARVALHO BARBOSA

**ANÁLISE DE MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM BORRACHA DE
PNEUS PELO PROCESSO SECO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Almeida de Melo

João Pessoa – PB
Novembro de 2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

ROBERTA DE CARVALHO BARBOSA

**ANÁLISE DE MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM BORRACHA DE
PNEUS PELO PROCESSO SECO**

Trabalho de Conclusão de Curso defendido em 25 de novembro de 2016 perante a seguinte
Banca Julgadora:

Prof. Dr. Ricardo Almeida de Melo

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Prof. Dr. Clóvis Dias

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Prof.a Dra. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal da Paraíba (UFPB), que me proporcionou um espaço para aprender sobre Engenharia Civil, com excelentes professores e técnicos administrativos. Agradeço ao esforço que cada um fez para que eu aprendesse todos os conteúdos e chegasse até aqui.

Ao meu orientador e Professor Dr. Ricardo Almeida de Melo, que se dispôs a me orientar com tanta paciência e atenção. Agradeço por todo o tempo que me foi dado, pela preocupação em todas as correções e reuniões, para que eu fizesse um bom trabalho.

Aos meus amados pais, Kátia e Antônio Barbosa, que são as peças fundamentais para todas as conquistas que realizei até o momento. Agradeço por todo o amor e confiança que me deram, e por todo o esforço que fizeram para que eu sempre tivesse a melhor educação.

Aos meus irmãos, e amigos, Renata e Rodrigo, por toda a paciência nos momentos mais estressantes enquanto graduanda e por toda a alegria que eles me transmitem. Agradeço por sempre me apoiarem nas minhas conquistas.

Ao meu querido Pedro Siqueira, por todo o suporte que me ofereceu na realização dos ensaios, sempre com muita disposição. Agradeço pela preocupação que teve comigo durante a realização deste trabalho e por ter me consolado nos momentos em que precisava.

A todos os técnicos do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LAPAV) da UFPB, em especial à Sérgio, que representou um papel fundamental neste trabalho e me ajudou sempre com muito bom humor e paciência. Agradeço por tudo que me ensinou e por ser um amigo para mim; e a Marcos, que também me auxiliou na realização dos ensaios com muita disposição.

A todos que se dispuseram a me ajudar nos ensaios do laboratório, de diversas formas. Dentre eles, Bismak, que me deu sugestões e conselhos muito úteis, e meus queridos amigos Adalice, Amanda, Camila, Davi, Fernanda, Ian, João Paulo, Lígia, Lucas, Natália, Nathália, Raimundo, Thaís e Thiago. Agradeço, pois todos foram essenciais para o andamento deste trabalho.

Aos queridos amigos que fiz na UFPB, em especial a Bia, Alice, Germano, Rosenai e Sérgio, que são pessoas maravilhosas que sempre me apoiaram em momentos felizes ou tristes.

Finalmente, a todos que contribuíram de alguma forma, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

RESUMO

A preocupação ambiental representa um dos principais fatores para justificar os estudos crescentes quanto ao reaproveitamento de materiais inservíveis que possam ser utilizados como alternativa de melhorar o desempenho de revestimentos asfálticos. Nesse contexto, este estudo consistiu em realizar um ensaio laboratorial, para avaliar o comportamento de misturas asfálticas modificadas com a incorporação de 1,0; 1,5; e 2,0%. O procedimento realizado, conhecido como *processo seco*, consiste na substituição de parte do agregado miúdo de uma mistura de referência que utiliza brita 19, brita 12 e pó de pedra como agregados, e 4,8% de asfalto. Foram preparadas três misturas asfálticas (M1, M2 e M3), para a realização da dosagem *Marshall* e do ensaio de compressão diametral dinâmico. O ensaio realizado forneceu os resultados quanto à estabilidade e à fluência, cujos valores foram utilizados para calcular o quociente *Marshall* das misturas. Os resultados da dosagem *Marshall* forneceram um teor de projeto de 6,5% para a mistura com adição de 1,0% de borracha (M1), e 7,1% para a mistura com 1,5% de borracha (M2). A mistura com 2,0% de borracha (M3) não apresentou resultados satisfatórios e foi considerada inadequada para ser utilizada na camada de revestimento asfáltico. O Quociente *Marshall* obtido para a M1, de 2.171,0 kgf/mm, mostrou que a mistura modificada tem tendência a ser menos rígida que a mistura de referência – cujo Quociente *Marshall* é de 2.184,8 kgf/mm – fator que pode ser explicado pela elevada deformação elástica que a borracha confere à mistura. Finalmente, concluiu-se que menores teores de borracha conferem melhores resultados quanto aos parâmetros *Marshall*. Ainda, a borracha de pneus inservíveis atuando como modificador de pavimentos asfálticos requer maior consumo de asfalto e eleva o custo inicial, porém, a longo prazo pode acarretar melhores desempenhos e redução dos custos de manutenção, quando comparado às misturas convencionais.

Palavras-chave: Asfalto-borracha. *Marshall*. Meio Ambiente. Misturas asfálticas. Revestimento.

ABSTRACT

Environmental concern is one of the main factors that justify increasing studies on reuse of waste materials. Some of those materials can be used as alternatives to improve the performance of asphalt coatings. In this context, this study investigated the behavior of modified asphalt mixtures in which ground tire rubber was added in three different contents: 1.0%; 1.5%; and 2.0%. The procedure used, known as *dry process*, replaces part of the fine aggregate of a reference mixture, which uses limestone aggregates in grading of 19 mm, 12 mm and crusher dust, and 4,8% of asphalt. Three asphalt mixes were prepared (M1, M2, and M3) and subjected to *Marshall* method mix design and dynamic diametric compression test. The tests provided results in terms of stability and fluency, whose values were used to calculate the *Marshall* Quotient of mixtures. The *Marshall* mix design results provided a 6.5% project content to the mixture with addition of 1.0% of rubber (M1) and 7.1% to the mixture with addition of 1.5% of rubber (M2). The mixture with 2.0% of added rubber (M3) did not provide satisfactory results and was considered inadequate to be used as asphalt coating layer. The *Marshall* Quotient obtained for mixture M1, 2171.0 kgf/mm, showed that the modified mixture has a tendency to be less rigid than the reference mixture – whose *Quotient Marshall* is 2.184,8 – which can be explained by the high elastic deformation provided by the rubber. Finally, it was concluded that lower rubber contents give the best results for the *Marshall* parameters. Further, the use of waste tire rubber as a modifier of asphalt pavements require higher consumption of asphalt and increases the initial cost, but, in long term, can lead to improved performance and reduced maintenance expense when compared to conventional blends.

Keywords: Asphalt-rubber. *Marshall*. Environment. Hot Mix Asphalt (HMA). Coating.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Camadas de pavimentos | 15 |
| Figura 2 – Aplicação do asfalto-borracha como “tratamento superficial” | 19 |
| Figura 3 – Aplicação do asfalto-borracha como camada de reforço | 20 |
| Figura 4 – Curva granulométrica da mistura de referência | 27 |
| Figura 5 – Agregados minerais utilizados na mistura | 29 |
| Figura 6 – Ligante asfáltico utilizado na mistura | 30 |
| Figura 7 – Depósito de armazenamento de borracha moída | 31 |
| Figura 8 – Curva granulométrica da borracha utilizada | 32 |
| Figura 9 – Borrachas peneiradas na fração 4,8 mm – 2 mm | 32 |
| Figura 10 – Borrachas peneiradas nas frações (a) 2 mm – 0,42 mm; (b) 0,42 mm – 0,3 mm; e (3) passantes na 0,3 mm | 33 |
| Figura 11 – Curva granulométrica da borracha no pó de pedra | 35 |
| Figura 12 – Preparação dos agregados para a moldagem dos corpos de prova..... | 36 |
| Figura 13 – Preparação da borracha para a elaboração dos corpos de prova | 37 |
| Figura 14 – Incorporação da borracha moída (a); Incorporação do asfalto (b)..... | 38 |
| Figura 15 – Homogeneização da mistura | 38 |
| Figura 16 – Compactador <i>Marshall</i> (a); Acomodação da mistura no molde (b) | 39 |
| Figura 17 – Corpos de prova moldados..... | 39 |
| Figura 18 – Desmolde do corpo de prova (a); Corpos de prova desmoldados (b)..... | 40 |
| Figura 19 – Execução do ensaio <i>Marshall</i> (a); Corpos de prova rompidos (b)..... | 42 |
| Figura 20 – Massa específica aparente | 43 |
| Figura 21 – Volume de vazios..... | 44 |
| Figura 22 – Vazios do agregado mineral..... | 45 |
| Figura 23 – Relação betume/vazios..... | 45 |
| Figura 24 – Estabilidade <i>Marshall</i> | 46 |
| Figura 25 – Fluência <i>Marshall</i> | 47 |
| Figura 26 – Comparativo do quociente <i>Marshall</i> das misturas..... | 48 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Especificação <i>PlusRide</i> ®, sugerida pela FHWA..... | 23 |
| Tabela 2 – Granulometria do pó de pedra da mistura de referência..... | 28 |
| Tabela 3 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados | 28 |
| Tabela 4 – Parâmetros <i>Marshall</i> da mistura de referência | 28 |
| Tabela 5 – Granulometria adotada para a borracha na mistura | 31 |
| Tabela 6 – Densidade da borracha..... | 33 |
| Tabela 7 – Massas adicionadas e excluídas das misturas de referência | 34 |
| Tabela 8 – Composição granulométrica das misturas | 35 |
| Tabela 9 – Teores de asfalto para valores limites do volume de vazios..... | 44 |
| Tabela 10 – Teores de asfalto para valores limites da relação betume/vazios | 46 |
| Tabela 11 – Teores de asfalto para valor limite de estabilidade <i>Marshall</i> | 46 |
| Tabela 12 – Resultado da dosagem <i>Marshall</i> | 47 |
| Tabela 13 – Resultado comparativo dos parâmetros <i>Marshall</i> | 48 |
| Tabela 14 – Ajuste percentual das misturas M1, M2 e M3..... | 54 |
| Tabela 15 – Ajuste das massas das misturas M1, M2 e M3..... | 55 |
| Tabela 16 – Espessuras médias dos corpos de prova (mm) | 56 |
| Tabela 17 – Massas específicas aparentes (DMT) das misturas M1, M2 e M3 | 56 |
| Tabela 18 – Massas específicas das misturas compactadas | 57 |
| Tabela 19 – Parâmetros volumétricos das misturas..... | 58 |
| Tabela 20 – Resultados da estabilidade e fluência <i>Marshall</i> | 59 |

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| ANIP | Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos |
| CAP | Cimento Asfáltico de Petróleo |
| CP | Corpo de prova |
| CPA | Camada Porosa de Atrito |
| CAUQ | Concreto Asfáltico Usinado a Quente |
| CONAMA | Conselho Nacional de Meio Ambiente |
| DMT | Densidade Máxima Teórica |
| DNER | Departamento Nacional de Estruturas de Rodagem |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| EM | Estabilidade <i>Marshall</i> |
| FHWA | <i>Federal Highway Administration</i> |
| FM | Fluência <i>Marshall</i> |
| FN | <i>Flow Number</i> |
| IBT | Instituto Brasileiro de Petróleo |
| M1 | Mistura asfáltica com 1,0% de borracha |
| M2 | Mistura asfáltica com 1,5% de borracha |
| M3 | Mistura asfáltica com 2,0% de borracha |
| RBV | Relação Betume/Vazios |
| SAM | <i>Stress Absorbing Membrane</i> |
| SAMI | <i>Stress Absorbing Membrane Interlayer</i> |
| SMA | <i>Stone Matrix Asphalt</i> |
| VAM | Vazios do agregado mineral |
| VCB | Vazios com Betume |
| Vv | Volume de vazios |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | Problemática | 11 |
| 1.2 | Justificativa | 13 |
| 1.3 | Objetivo | 13 |
| 1.4 | Estruturação do trabalho | 14 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 15 |
| 2.1 | Pavimentos..... | 15 |
| 2.2 | Misturas asfálticas..... | 16 |
| 2.2.1 | Desempenho de pavimentos | 17 |
| 2.3 | Borracha em misturas asfálticas..... | 18 |
| 2.3.1 | Processos de aplicação da mistura asfáltica modificada | 18 |
| 2.3.2 | Vantagens e desvantagens da borracha em misturas asfálticas | 20 |
| 2.3.3 | Os processos de reaproveitamento dos pneus..... | 22 |
| 2.3.4 | Variáveis que influenciam o comportamento da mistura com borracha | 24 |
| 2.4 | Dosagem <i>Marshall</i> | 25 |
| 3 | MÉTODO DE TRABALHO | 27 |
| 3.1 | Mistura de referência | 27 |
| 3.2 | Materiais utilizados..... | 28 |
| 3.2.1 | Agregados minerais | 28 |
| 3.2.2 | Ligante asfáltico | 29 |
| 3.2.3 | Borracha de pneu | 30 |
| 3.2.4 | Misturas modificadas com borracha..... | 33 |
| 3.3 | Dosagem das misturas asfálticas..... | 35 |
| 3.3.1 | Preparação dos materiais | 36 |
| 3.3.2 | Moldagem dos corpos de prova..... | 37 |
| 3.3.3 | Parâmetros <i>Marshall</i> | 40 |
| 4 | ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 43 |
| 5 | CONCLUSÕES | 50 |
| | REFERÊNCIAS | 51 |
| | APÊNDICE A – Ajuste das massas das misturas M1, M2 E M3..... | 54 |
| | APÊNDICE B – Resultados da dosagem <i>Marshall</i>..... | 56 |
| | ANEXO A – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo – Classificação por penetração | 60 |
| | ANEXO B – Valores limites para parâmetros <i>Marshall</i>..... | 61 |
| | ANEXO C – Valores mínimos de vazios de agregado mineral | 62 |
| | ANEXO D – Correção da estabilidade, em função da espessura do corpo de prova | 63 |

1 INTRODUÇÃO

Os pneus de automóveis são materiais resistentes cuja estrutura é constituída de borrachas natural e sintética, negro de fumo, aço e tecidos, basicamente. A borracha natural fornece as propriedades elásticas, enquanto que a borracha sintética proporciona a estabilidade térmica, o que representam características importantes para que os pneus sejam considerados adequados para a reutilização, de modo a evitar o seu descarte inapropriado.

O estado da Paraíba é reconhecido nacionalmente como exportador de artefatos confeccionados com borrachas recicladas de pneus inservíveis. A cultura da reciclagem é bastante difundida e incentivada no artesanato paraibano, entretanto, o mesmo não ocorre quanto ao reaproveitamento de pneus em revestimento asfáltico.

O pneu inservível é todo aquele que atingiu a sua vida útil e não tem mais condições de ser utilizado para a circulação ou reforma. A Resolução 558/80 do Contran, no seu artigo 4º, define o que pode ser considerado um pneu inservível.

Art. 4º - Fica proibida a circulação de veículo automotor equipado com pneu cujo desgaste da banda de rodagem tenha atingido os indicadores ou cuja profundidade remanescente da banda de rodagem seja inferior a 1,6 mm (Resolução 558/80 – Contran)

Dentre todas as possíveis utilizações dos pneus, podem ser destacados a recauchutagem e a remoldagem, que consistem na reconstrução do pneu; a regeneração da borracha, para que esta possa ser reutilizada na confecção de artefatos; coprocessamento de resíduos de pneus, cujo reaproveitamento em indústrias especializadas gera substitutos de combustível; e, finalmente, a sua aplicação em misturas asfálticas.

A adição de polímeros em pavimentos, como a borracha de pneus, tornou-se uma prática muito comum em diversos países, pois concomitante aos diversos métodos que podem ser utilizados para a melhora das condições dos asfaltos, existe a preocupação com o desenvolvimento de materiais que tragam benefícios ao meio ambiente. (NETO et al., 2003).

1.1 Problemática

O descarte de pneus inservíveis representa um problema de difícil solução, pois esses são volumosos que devem ser armazenados adequadamente de modo a evitar a proliferação de agentes transmissores de doenças e o risco de incêndio, que pode contaminar o ar com uma

fumaça altamente tóxica (ODA; FERNANDES JUNIOR, 2001). Ainda, a disposição em aterros sanitários se torna inviável, pois os pneus inteiros dificultam a compactação e se degradam lentamente, o que é prejudicial aos aterros sanitários (BERTOLLO, 2002).

Dados da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) mostram que em 2015 foram produzidos 68,63 milhões de pneus em todo o Brasil. A reciclagem de pneus pela Reciclanip¹ foi estimada no equivalente a 90,3 milhões de pneus de passeio para o mesmo ano. Embora esses dados representem, atualmente, uma boa taxa de aproveitamento em relação à produção nacional, menos de 30% desses são utilizados para a produção de asfalto-borracha, demonstrando que a bibliografia e a prática nacional nesse assunto ainda são reduzidas (PINHEIRO, 2004).

O incentivo para a utilização do asfalto modificado com borracha no Brasil deu-se à criação da resolução 258/99 Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) que entrou em vigor em 2002, cujo artigo 1º justifica:

Art.1o As empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida nesta Resolução relativamente às quantidades fabricadas e/ou importadas (Resolução nº 258/99 – CONAMA).

A partir disso, novas leis foram criadas pelo Brasil, como ocorreu no estado São Paulo, na cidade do Rio de Janeiro e na Paraíba, por exemplo. Segundo a lei estadual nº 14.691, de 06 de janeiro de 2012, o estado de São Paulo deve utilizar a borracha proveniente da reciclagem de pneus inservíveis nas rodovias estaduais sempre que possível, de modo a conservá-las.

No estado da Paraíba, a 25 de novembro de 2013 promulgou-se a lei nº 10.164, que dispõe sobre o uso do asfalto borracha nas obras públicas de pavimentação e recapeamento realizadas na Paraíba. A partir dessa data, prioriza-se o uso de agregados reciclados, inclusive de pneus, em obras de pavimentação. Entretanto, não existem pavimentos revestidos com asfalto modificado com borracha na Paraíba, segundo informações do DNIT, ainda devido à grande falta de interesse em investimento nesse tipo de mistura asfáltica.

¹ A Reciclanip é considerada uma das maiores iniciativas da indústria brasileira na área de responsabilidade pós-consumo. O projeto teve início em 1999, com o Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis, implantado pela ANIP, entidade que representa os fabricantes de pneus novos no Brasil. (Reciclanip)

Entretanto, mesmo com as leis de incentivo, apenas cerca de oito mil quilômetros de rodovias brasileiras são pavimentadas com asfalto-borracha, segundo pesquisadores (BETU-SEAL, 2015a), estimando-se em 80 mil pneus reaproveitados no país. Apesar dos dados não serem precisos, se comparado esse valor com os 170 mil quilômetros de rodovias pavimentadas que existem no Brasil, vê-se que o percentual ainda é muito baixo

Nos Estados Unidos, entretanto, essa tecnologia começou a ser regulamentada em janeiro de 1995, quando se exigia uma porcentagem mínima de borracha a ser utilizada em asfalto. Assim, em 1995 se teria 10% de borracha da porcentagem total de tonelada de asfalto de cada estado; em 1996, 15%; e a partir de 1997, 20% (FHWA, 1993).

1.2 Justificativa

O modo rodoviário requer condições ideais para sua utilização, de modo que se diminuam os custos de operação dos serviços de transportes. Dessa forma, a utilização da borracha de pneus em asfaltos se encontra como uma excelente solução para melhorar o desempenho dos revestimentos asfálticos, mas ainda se faz necessário o investimento em pesquisas visando, principalmente, o barateamento da tecnologia. Os estudos sobre essa metodologia requerem o conhecimento sobre as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais envolvidos, assim como as suas possíveis combinações (SPECHT, 2004).

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho foi estudar o potencial da incorporação de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas, pelo processo seco, em substituição parcial dos agregados minerais de uma mistura asfáltica convencional. Assim, algumas atividades foram realizadas:

- a) Determinação a granulometria da borracha adequada à mistura utilizada como referência, assim como o teor de borracha inserido;
- b) Realização da dosagem *Marshall* para a determinação do melhor teor de asfalto utilizado na mistura;
- c) Realização do ensaio *Marshall* para a determinação da estabilidade e da fluência;
- d) Elaboração de gráficos com os parâmetros de dosagem *Marshall* para cada teor de borracha;
- e) Comparação dos resultados com a mistura asfáltica de referência e entre cada teor de borracha adotado.

1.4 Estruturação do trabalho

Esse trabalho é dividido em 5 capítulos. Inicialmente, neste capítulo 1 realizou-se uma breve análise da importância da incorporação de borracha de pneu para o meio ambiente, através de dados referenciados e resultados de pesquisas realizadas; apresentou-se a problemática desse tema, justificando sua importância de estudo e foram apresentados os objetivos deste trabalho.

O capítulo 2 constitui a fundamentação teórica, em que são apresentados os principais elementos de estudo deste trabalho, tais como o pavimento, as misturas asfálticas, a influência da borracha nas misturas e os parâmetros de dosagem *Marshall*.

O capítulo 3 aborda o método de trabalho, em que são caracterizadas as misturas de referência e os materiais utilizados nas misturas de ensaio, através da determinação de suas curvas granulométricas e os teores adequados. Além disso, é realizada a descrição da moldagem dos corpos de prova e do ensaio *Marshall*, e são apresentados os parâmetros a serem analisados.

O capítulo 4 expõe os resultados e as discussões obtidas a partir da metodologia aplicada e justificada no capítulo anterior. São analisados os gráficos para cada parâmetro calculado, realizando análises comparativas entre os diferentes teores de borracha e a mistura asfáltica de referência.

Finalmente, no capítulo 5, apresentam-se as considerações finais com base na fundamentação teórica realizada no capítulo 2 e nos experimentos elaborados no capítulo 4.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

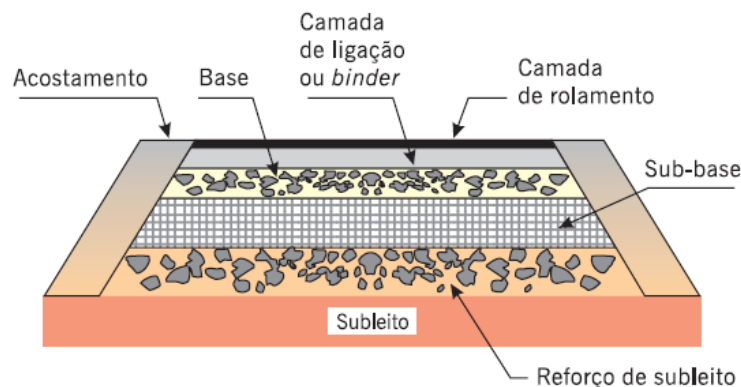
Neste capítulo, são discutidos os principais estudos e definições que envolvem a utilização da borracha em concreto asfáltico pelo processo seco, a fim de possibilitar a análise dos resultados e criar parâmetros de referências. São estudadas as propriedades dos materiais e as possíveis combinações dessas para a elaboração das misturas, assim como a importância de sua utilização.

2.1 Pavimentos

SENÇO (1997) define pavimento como uma estrutura construída sobre a terraplanagem e destinada, técnica e economicamente, a melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança e resistir aos esforços verticais e horizontais oriundos do tráfego e do desgaste, respectivamente, e distribuí-los para as camadas subjacentes, tornando mais durável a superfície de rolamento.

O pavimento é constituído de camadas finitas, tais como revestimento (ou camada de rolamento), sub-base, base, reforço do subleito assentadas em um espaço semi-infinito que exerce função de fundação da estrutura, chamado de subleito. Essa estrutura construída sobre o leito de terra pode variar na espessura e nos materiais utilizados, de forma que seja possível atender às solicitações exercidas sobre elas e à função de transporte adequado aos seus usuários (SENÇO, 1997). A Figura 1 ilustra as camadas de pavimentos.

Figura 1 – Camadas de pavimentos



Fonte: (BERNUCCI et al., 2010)

De forma geral, os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, semirrígidos e rígidos. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), os pavimentos flexíveis são aqueles que apresentam camadas que sofrem deformações elásticas

significativas devido ao carregamento aplicado, que se distribuem em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.

Um exemplo típico desse tipo de pavimento, ainda segundo o DNIT (2006), é o pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada ou macadame), ou de solo pedregulhoso, sob um revestimento betuminoso. Esse tipo de revestimento é constituído por uma associação de agregados e materiais betuminosos, conhecida como mistura asfáltica.

2.2 Misturas asfálticas

O CAUQ é uma das misturas asfálticas mais utilizadas no Brasil e trata-se do produto da combinação de agregados em diversos tamanhos e de cimento asfáltico, ambos aquecidos a temperaturas específicas, de acordo com a característica viscosidade-temperatura do ligante, e em proporções convenientemente escolhidas. Esse tipo de mistura é utilizado como revestimento de pavimentos que apresentam qualquer volume de tráfego. (BERNUCCI et al, 2010).

O cimento asfáltico convencional utilizado no CAUQ é o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). A Petrobrás define o CAP como um material termosensível proveniente da destilação de tipos específicos de petróleo, na qual a gasolina, o querosene e o diesel são retirados. Ele é principalmente utilizado em trabalhos de pavimentação graças à sua flexibilidade, à alta resistência à ação da maioria dos ácidos inorgânicos, sais e álcalis e, além disso, às suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes. Através do conhecimento prévio da curva de viscosidade/temperatura, é possível aplicar o CAP, desde que este se apresente homogêneo e livre de água. Os tipos recomendados pela Petrobrás para utilização em asfalto são os CAP 30/45, 50/70 e 85/100, segundo sua classificação por penetração.

Ainda, há a Camada Porosa de Atrito (CPA) e o *Stone Matrix Asphalt* (SMA), que são tipos especiais de misturas asfálticas, colocadas sobre outra camada preexistente. A CPA é utilizada como camada de rolamento de modo a aumentar aderência pneu-pavimento, através da redução da espessura da lâmina d'água na superfície, e o SMA é um tipo de revestimento utilizado para maximizar o contato entre os agregados, aumentando a interação grão/grão. Ambos as misturas podem ser melhoradas com a adição de polímeros, como a borracha de pneu inservível, para aumentar a durabilidade e reduzir a desagregação (BERNUCCI et al. 2010).

No pavimento, o ligante asfáltico atua como um agente aglutinante e impermeabilizante, sendo responsável pela resistência à ação mecânica de desagregação produzida pelas cargas provindas do tráfego e à ação da água. Os agregados minerais, em contrapartida, fornecem resistência mecânica e flexibilidade à camada de rolamento quando unido pelo ligante asfáltico (BERTOLLO, 2002).

2.2.1 Desempenho de pavimentos

Os pavimentos com revestimento em concreto asfáltico são submetidos a diversos modos de deterioração, dentre os quais o trincamento das camadas asfálticas se destaca como um dos mais ocorrentes e que pode ser justificado pela repetição de cargas do tráfego (GONÇALVES, 2002).

A norma DNIT 005/2003 – TER define os termos técnicos utilizados para caracterizar os defeitos que ocorrem em pavimentos flexíveis e semirrígidos. Assim, o trincamento pode ser caracterizado como uma fenda existente no revestimento, visível a mais de 1,50 m de distância. As trincas podem ser do tipo transversal ou longitudinal em relação ao eixo da via e, ainda, decorrentes tanto de fenômenos de fadiga, quanto de retração térmica. Além disso, a norma caracteriza como defeitos dos pavimentos a ondulação, o escorregamento, a exsudação, o desgaste, o buraco e o remendo.

Entre as deformações permanentes em pavimentos, incluem-se os afundamentos nas trilhas de roda, deformações plásticas no revestimento e depressões. Tais deformações podem afetar o desempenho de rolamento, aumentar o custo de operação dos veículos e, além disso, prejudicar a segurança dos usuários devido ao acúmulo de água. Uma das causas da ocorrência acentuada de deformação permanente nas trilhas de roda é a baixa resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas, que depende da susceptibilidade térmica do ligante asfáltico e do esqueleto dos agregados minerais (NEVES FILHO, 2004).

No dimensionamento dos pavimentos rodoviários, considera-se, entre outros, a análise de dois critérios: resistência à fadiga e às deformações permanentes. Uma elevada resistência à fadiga e reduzidas deformações permanentes conduzem, geralmente, a um aumento da longevidade do pavimento, o que justifica o aumento de pesquisas sobre a utilização de materiais que garantam essas condições, sendo a borracha de pneus um deles (MACHADO, 2013).

2.3 Borracha em misturas asfálticas

Os potenciais benefícios da adição de borracha ao asfalto têm sido discutidos durante muitos anos, no entanto não houve o desenvolvimento da metodologia devido à falta de tecnologia e equipamentos para misturar economicamente a borracha no cimento asfáltico. O uso da borracha natural no cimento asfáltico foi introduzido pela primeira vez na década de 1840, mas o seu conceito só foi desenvolvido na década de 1950. Entretanto, apenas em 1964 o uso de borracha de pneus como modificador em misturas de asfalto foi aplicado pela primeira vez em um pavimento já existente (FHWA, 1993).

Em 1963, *Charles H. McDonald* foi o pioneiro no desenvolvimento do processo úmido de utilização da borracha em asfaltos nos Estados Unidos. Ele usou inicialmente uma liga para reparar as ruas da cidade de *Phoenix*, no Arizona, ao perceber que os pneus triturados poderiam proporcionar um material altamente elástico (MARTINS, 2004).

Esse sistema ligante foi aplicado por pulverização, para restauração de um pequeno trecho do pavimento. Apenas em 1967, ele foi utilizado em um longo trecho de rodovia, porém, apresentou resultados insatisfatórios em relação ao que se desejava, devido à grande viscosidade relativa ao asfalto tradicional. Ao se reduzir a concentração da quantidade de fragmentos de borracha através do uso de diluentes, e pela alteração da distribuição do asfalto, grandes aplicações em pavimentos foram realizadas com sucesso, na década de 70 (MARTINS, 2004).

Atualmente, os estados da Califórnia, Flórida e Arizona já possuem um grande conhecimento a respeito da utilização de resíduos de borracha em pavimentação. Estima-se que somente no estado do Arizona, mais de 3.300 km de rodovias foram construídas ou restauradas utilizando ligantes modificados com borracha, o que representa cerca de 90% dos serviços de pavimentação. Na Califórnia, o asfalto-borracha é aplicado em capas selantes, em membranas absorvedoras de tensão e como selante de trincas e juntas.

2.3.1 Processos de aplicação da mistura asfáltica modificada

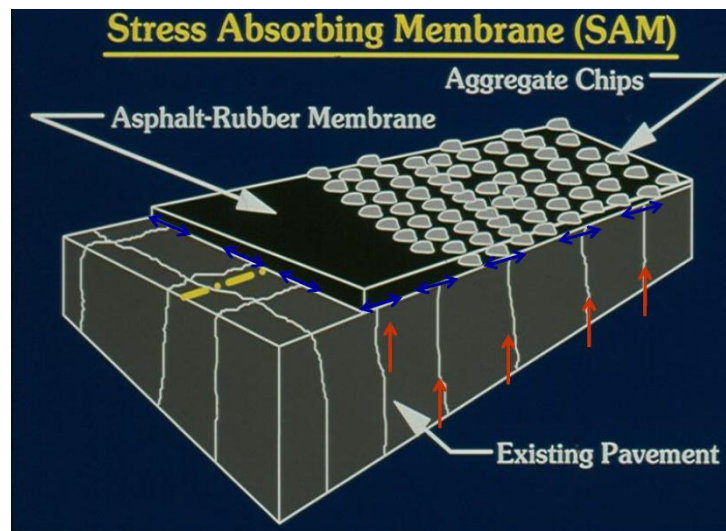
A selagem de fissuras e trincas em pavimentos flexíveis ou rígidos com selante asfáltico modificado com a adição de elastômeros é indicada quando se pretende impedir a entrada de água (ou outros materiais) entre os espaços vazios do pavimento, de modo que se diminua a necessidade de reparos e aumente a vida útil do pavimento, e para realizar o tratamento das

juntas de dilatação entre pavimentos e tabuleiros de pontes. Aconselha-se sempre a utilização de materiais elásticos, pois estes possuem a memória de retorno necessária para que as fendas possam se movimentar constantemente, não apenas devido às ações mecânicas, como também devido às ações térmicas.

Segundo ODA e FERNANDES JUNIOR (2001) e WAY (2012), pode-se aplicar o asfalto-borracha como um “tratamento superficial” através da distribuição de asfalto-borracha sobre um pavimento existente e posterior espalhamento de agregados uniformes sobre o ligante, de modo a retardar a formação de trincas por reflexão em pavimentos. A esse processo dá-se o nome de *Stress Absorbing Membrane (SAM)*, conforme ilustra a Figura 2.

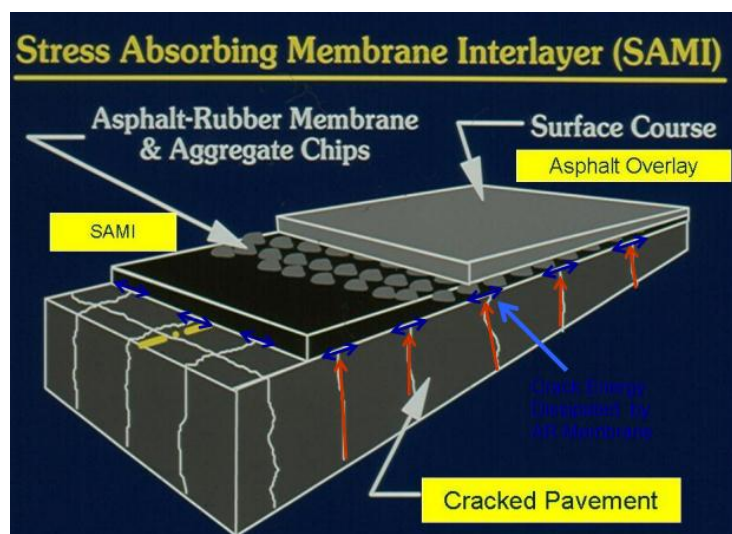
Ainda, o asfalto-borracha pode ser aplicado entre camadas de CAUQ, exercendo a função de selante de trincas e como camada de reforço. A esse processo dá-se o nome de *Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI)*, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 2 – Aplicação do asfalto-borracha como “tratamento superficial”



Fonte: WAY (2012)

Figura 3 – Aplicação do asfalto-borracha como camada de reforço



Fonte: WAY (2012)

Finalmente, pode-se utilizar o CAUQ modificado com borracha como revestimento asfáltico, em substituição das misturas convencionais. O primeiro trecho de CAUQ modificado com borracha a ser utilizado no Brasil foi em 2001, no trecho da rodovia BR 116/RS, no Estado do Rio Grande do Sul, apresentando resultados positivos quanto ao aparecimento de fissuras após cinco anos da sua execução.

2.3.2 Vantagens e desvantagens da borracha em misturas asfálticas

CURY et al. (2002) e FHWA (1993) definem como principais vantagens adquiridas com o asfalto-borracha:

- a) **Redução do aparecimento de fissuras no asfalto sobreposto:** trincas no pavimento podem ocorrer em camadas sobrepostas do revestimento com concreto asfáltico. Essas fissuras são causadas por movimentos verticais e horizontais resultantes de cargas de tráfego, variação da temperatura e movimento de terra que afetam o pavimento;
- b) **Redução dos custos de manutenção:** geralmente, rodovias com asfalto convencional exigem algum tipo de manutenção com baixo intervalo anual. Rodovias com asfalto-borracha geralmente apresentam um tempo de manutenção reduzido em relação aos asfaltos tradicionais, graças à sua resistência ao envelhecimento e à fissuração;
- c) **Aumento da vida útil do pavimento:** após anos de exposição a diversos elementos, o asfalto pode perder sua elasticidade ou resiliência através da oxidação. Durante esse processo, os materiais de pavimentação também estão sujeitos a esforços repetidos de expansão e contração devido a mudanças de temperatura, o que resulta no aparecimen-

- to de trincas. Como dito anteriormente, esse fator também se dá devido ao asfalto-borracha ser mais resistente ao efeito antioxidante e devido à sua grande elasticidade;
- d) **Melhoria da resistência à derrapagem:** bastante importante para a segurança nas rodovias, devido à maior estabilidade do veículo no pavimento;
 - e) **Diminuição dos níveis de ruído:** o asfalto-borracha tende a diminuir de três a cinco decibéis o ruído em pavimento, quando comparado à mistura convencional;
 - f) **Redução da camada asfáltica:** quando a borracha é incorporada na mistura asfáltica e aplicada em revestimentos asfálticos, pode-se ter a redução de até 50% na sua espessura, diminuindo a utilização de asfalto e de agregados;
 - g) **Diminuição do descarte incorreto de pneus inservíveis:** com a utilização em massa de pneus inservíveis na implementação do asfalto, vê-se uma redução dos pneus que são descartados inadequadamente. Estima-se o uso de 20 a 30 t de pneus por km.
 - h) **Redução da suscetibilidade térmica:** a borracha na mistura asfáltica resulta em melhores características de desempenho tanto em climas frios, como em climas quentes, quando comparados com o asfalto convencional.

Entretanto, apesar de tantas vantagens, CURY et al. (2002) e o DNIT (2006) também definem algumas desvantagens que ainda requerem estudos e investimentos para serem solucionadas. Algumas delas são:

- a) **Aumento do custo de fabricação:** estima-se que o investimento na fabricação é maior no Brasil que comparado aos Estados Unidos, devido ao maior custo de mão de obra. Além disso, há o aumento do teor de asfalto das misturas modificadas, quando comparada às misturas convencionais;
- b) **Falta de investimento:** no Brasil, principalmente na Paraíba, apesar de existirem leis que promovam o uso da borracha em asfalto, ainda há muito preconceito quando a verdadeira eficiência dos resultados, o que sugere a falta de investimento no produto;
- c) **Produção de ruídos durante sua fabricação:** segundo informações do DNIT de João Pessoa, o estado do Rio Grande do Sul parou seus investimentos na produção de asfalto-borracha devido aos ruídos provocados pelas usinas misturadoras quando há a fabricação em grande escala. Optou-se no estado, portanto, pelo uso do asfalto-borracha em calçadas.

2.3.3 Os processos de reaproveitamento dos pneus

O processo de incorporação de pneus nas misturas asfálticas não consiste simplesmente na adição da borracha na liga asfáltica, mas, sim, em procedimentos cuidadosamente monitorados e planejados, para produzir um material de borracha limpo e altamente consistente.

Existem dois métodos conhecidos de incorporação da borracha de pneus na mistura asfáltica. A nomenclatura *asfalto-borracha* é proveniente de um desses métodos, conhecido como processo úmido, em que se tem a adição de partículas da borracha ao ligante asfáltico antes do acréscimo dos agregados. O outro método é conhecido como processo seco e seu procedimento se dá através da mistura da borracha aos agregados antes da adição do ligante asfáltico, cujo produto pode ser chamado de *concreto asfáltico modificado com adição de borracha* (BERTOLLO et al., 2002).

2.3.3.1 Processo úmido

No processo úmido, um teor mínimo de 15% de borracha em relação ao peso do ligante (ou cerca de 0,9% de borracha em relação à mistura) é previamente misturado ao ligante asfáltico seguindo a norma DNIT 111/2009 – EM antes de incorporar o agregado, modificando-o permanentemente em uma liga química, melhorando as propriedades do concreto asfáltico. Nesta modalidade ocorre a transferência mais efetiva das características de elasticidade e resistência ao envelhecimento para o ligante asfáltico original (SOARES; ASSIS, 2008).

A produção de asfalto-borracha pelo processo úmido envolve a avaliação dos principais componentes, ou seja, asfalto, borracha e aditivos, tendo em conta o aperfeiçoamento das propriedades do asfalto-borracha, para uma gama de tempo de digestão e de temperatura de fabricação, a estabilidade da mistura ao longo do tempo e as proporções dos componentes visando obter as propriedades desejadas do novo ligante (ZANZOTTO; KENNEPOHL, 1996). No Brasil, o seu procedimento executivo deve atender às condições gerais impostas pela norma DNIT 111/2009 – EM.

Segundo a FHWA (1993), existem dois tipos de processo úmido de incorporação de borracha: a metodologia de *McDonald* e a tecnologia *continuous blending*, que diferem na granulometria da borracha utilizada, sendo esta mais grossa que aquela.

2.3.3.2 Processo seco

No processo seco, a borracha sofre trituração e suas partículas posteriormente são misturadas com o agregado antes de serem adicionadas ao cimento asfáltico. Neste caso, existe a substituição de no máximo 6% do agregado em peso por essas partículas de borracha, sendo 3% o teor normalmente utilizado. A transferência de propriedades importantes da borracha ao ligante é prejudicada, embora seja possível agregar melhorias à mistura asfáltica, desde que na sua fabricação seja possível obter uma mistura homogênea (ODA; FERNANDES JUNIOR, 2001; FHWA, 1993).

A mistura modificada com adição de borracha via seca só deve ser utilizada em misturas asfálticas a quente (concreto asfáltico convencional ou com granulometria especial descontínua – *gap-graded*, por exemplo), não devendo ser usada em misturas a frio (SPECHT, 2004; PINHEIRO, 2004).

Existem três tecnologias da adição de borracha de pneus: a tecnologia patenteada nos Estados Unidos como *PlusRide*®, o processo genérico (*generic technology*) e o *Chunk Rubber* (borracha “graúda”) (BERTOLLO, 2002; FHWA, 1993).

No processo *PlusRide*®, os agregados apresentam descontinuidade na sua curva granulométrica para a inserção de partículas de borracha de até ¼" e geralmente com teor de 3% em relação ao peso total da mistura (BERTOLLO, 2002). A porcentagem de asfalto geralmente varia entre 7,50 e 9,0%, o que é substancialmente maior do que a usualmente utilizada, e o volume de vazios desejado encontra-se entre 2 e 4%. (FHWA, 1993). A granulometria sugerida pela FHWA é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificação *PlusRide*®, sugerida pela FHWA

| Peneira | Porcentagem passante (%) |
|----------------|---------------------------------|
| ¼" | 100 |
| #4 | 76-100 |
| #10 | 28-42 |
| #20 | 18-24 |

Fonte: FHWA (1993)

O processo *Chunk Rubber* é o mais recente entre os três. Foi desenvolvido em 1990 nos Estados Unidos com pesquisas concentradas no aumento da quantidade de borracha utilizada e no aumento do seu tamanho em relação ao *PlusRide*®. O principal objetivo deste pro-

cesso é aumentar o desempenho dos pavimentos asfálticos a serem construído em regiões de clima frio (BERTOLLO, 2002).

Já o processo genérico utiliza curvas granulométricas densas, com a utilização de partículas de borracha mais finas quando comparadas ao *PlusRide*®, de modo que ocorra a reação parcial com o ligante asfáltico. Geralmente são utilizados teores menores que 2% do peso total da mistura (EPPS, 1994).

O processo seco é considerado mais econômico que o processo úmido, porém ainda acarreta grandes dúvidas quanto à sua capacidade de aumentar a durabilidade do pavimento, pois estudos mostram que o processo úmido garante resultados melhores e possui capacidade de aumentar até dez vezes a durabilidade do pavimento (MACHADO, 2013).

2.3.4 Variáveis que influenciam o comportamento da mistura com borracha

Não existem medidas exatas para determinar qual a quantidade e a granulometria da borracha (SPECHT, 2004). Entretanto, em relação à introdução da borracha pelo processo seco, existem fatores que influenciam o comportamento da mistura asfáltica modificada, como: a granulometria da borracha, o tempo de digestão da mistura, o teor de borracha, a temperatura dos materiais e a homogeneidade da mistura.

BERTOLLO (2002) realizou ensaio de resistência à compressão diametral dinâmico e ensaio de resistência à tração por compressão diametral utilizando 1,0 e 2,0% de borracha em um processo seco e com duas granulometrias de borracha, em substituição de parte do agregado. Consideraram-se tempos de digestão de zero, duas e quatro horas a 150° C. Esses ensaios foram comparados a uma mistura de controle com 6,2% de CAP 20, em que foi observado que a adição de partículas de 1,18 a 0,15 mm propiciou a melhoria no desempenho quanto à deformação permanente. Ainda, maiores teores de borracha agrupados a menores tamanhos resultaram em menores módulos de resiliência, e maiores teores de borracha apresentaram menores resultados de resistência à tração.

PINHEIRO (2004) estudou a substituição de 2,5% da mistura total por borracha, em três granulometrias diferentes, como parte do agregado mineral. As misturas com partículas de borracha de 2,0 a 0,075 mm apresentaram um excelente comportamento mecânico quanto ao módulo de resiliência e resistência à tração, quando comparadas às misturas convencionais. Além disso, verificou-se que o tempo de digestão é importante para o processo seco, pois é o

fator que aproxima o processo seco do processo úmido, melhorando os seus resultados quanto ao volume de vazios e comportamento mecânico.

SPECHT (2004) adicionou de 0,2; 0,6; 1,0 e 3,0% de borracha nas misturas asfálticas, em duas faixas granulométricas: densa e descontínua. Foram considerados três tempos distintos de digestão (zero, uma e duas horas) em corpos-de-prova com 1,0% de borracha, cujas características de resistência à fadiga e ao trincamento térmico apresentaram melhores resultados. Entretanto, menores teores de borracha foram mais susceptíveis à desagregação da mistura asfáltica.

Por fim, a homogeneidade da mistura é necessária para que o ligante possa cobrir todos os agregados e reagir adequadamente com a borracha, de modo que suas qualidades sejam melhoradas.

2.4 Dosagem *Marshall*

A dosagem *Marshall* é uma das metodologias de dosagem de misturas asfálticas mais utilizadas mundialmente, fazendo uso da compactação por impacto. É considerado o método mais usado no Brasil, normatizado pela DNER-ME 043/95. Apesar disso, há controvérsias de que esse tipo de dosagem produz corpos de prova com densidades que não condizem com as do pavimento em campo.

Esse método apresenta diversas alternativas para escolha do teor de projeto, isto é, a quantidade ideal de ligante asfáltico que garanta o melhor comportamento da mistura, atendendo às especificações da norma DNIT 031/2004 – ES. No Brasil, é comum ser utilizado o teor de ligante correspondente a um volume de vazios de 4% (DNIT, 2006).

Os parâmetros determinados na dosagem *Marshall* podem ser analisados quanto ao teor de asfalto, através de gráficos. São eles:

- a) Volume de vazios (Vv);
- b) Vazios do agregado mineral (VAM);
- c) Densidade aparente;
- d) Densidade máxima teórica (DMT);
- e) Relação betume/vazios (RBV);
- f) Vazios com betume (VCB).

A partir do ensaio *Marshall*, encontram-se os parâmetros de estabilidade *Marshall* (EM), que representa a resistência máxima à compressão radial do corpo de prova, expressa em kgf; e a fluência *Marshall* (FM), que representa a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga nula até a carga máxima, expressa em décimos de milímetros.

FAXINA (2002) mostra que alguns estudos concluíram que o asfalto-borracha apresenta diminuição da estabilidade e aumento da fluência quando comparados às misturas convencionais, mas ainda existem estudos em que foram encontrados maiores valores para a estabilidade. Nesse caso, dependendo do procedimento utilizado para a moldagem dos corpos de prova, pode-se chegar a diferentes valores comparativos entre as misturas convencionais.

Quanto à incorporação da borracha pelo processo seco, HANSON et al. (1994) concluiu que uma mistura modificada com uma graduação grosseira de borracha tende a apresentar um resultado de estabilidade 49% menor, e resultado de fluência 50% maior que comparada a uma mistura modificada com graduação de borracha relativamente mais fina.

3 MÉTODO DE TRABALHO

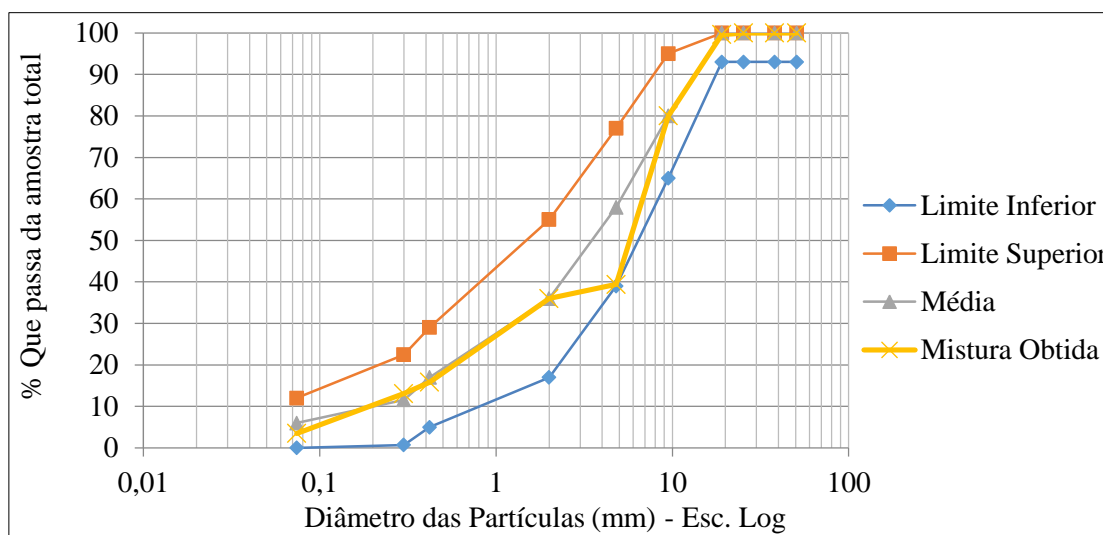
Neste trabalho, foi estudado o revestimento betuminoso pré-misturado a quente de graduação densa, denominado de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), modificado com borracha de pneus, de modo que pudesse ser utilizado na camada de rolamento (camada apresentada na Figura 1). Dessa forma, seguiram-se algumas etapas de trabalho:

- Estudo da composição e da caracterização das misturas de referência, de acordo com ASSIS (2015);
- Avaliação do teor de borracha;
- Avaliação da granulometria da borracha;
- Avaliação das misturas modificadas segundo a metodologia de BERTOLLO (2002).

3.1 Mistura de referência

Este trabalho é baseado na mistura de referência C1 descrito por ASSIS (2015). Foram utilizados como agregados a brita 19, a brita 12 e o pó de pedra. A Figura 4 apresenta a granulometria da mistura de referência.

Figura 4 – Curva granulométrica da mistura de referência



Fonte: ASSIS (2015)

A partir da fundamentação teórica apresentada no capítulo 2, optou-se pela substituição de parte do pó de pedra pela borracha. Assim, deve-se conhecer a granulometria do pó de pedra, ilustrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Granulometria do pó de pedra da mistura de referência

| Peneira (mm) | % passante |
|--------------|------------|
| 4,8 | 100 |
| 2 | 98,1 |
| 0,42 | 41,53 |
| 0,3 | 34,18 |
| 0,074 | 8,22 |

Fonte: ASSIS (2015)

Os agregados graníticos utilizados foram ensaiados para caracterização física através da abrasão Los Angeles, da absorção e da massa específica, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados

| Ensaio/Material | Agregado granítico | | |
|---------------------------------------|--------------------|----------|-------------|
| | Brita 19 | Brita 12 | Pó de pedra |
| Abrasão <i>Los Angeles</i> (%) | 40 | - | - |
| Absorção (%) | 0,7 | 1,1 | - |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,75 | 2,73 | 2,73 |

Fonte: ASSIS (2015)

A partir da realização da dosagem *Marshall*, têm-se os parâmetros calculados, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros *Marshall* da mistura de referência

| Teor de projeto (%) | Estabilidade (kgf) | <i>Gmb</i> (g/cm ³) | <i>Vv</i> (%) | <i>VAM</i> (%) | <i>RBV</i> (%) | <i>f</i> (mm) |
|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 4,8 | 1005 | 2,44 | 3,53 | 15 | 76,67 | 0,46 |

Fonte: ASSIS (2015)

3.2 Materiais utilizados

Os materiais utilizados foram agregados minerais, cimento asfáltico de petróleo (CAP) e borracha de pneus inservíveis.

3.2.1 Agregados minerais

Os agregados são naturais de granito e calcário, nas frações 19 mm, 12 mm e pó de pedra, conforme ilustra a Figura 5, provenientes de uma pedreira comercial localizada na cidade de João Pessoa. A obtenção desses agregados foi baseada em ASSIS (2015), que realizou a britagem, seguido do peneiramento, de maticões para a separação das frações desejadas.

Figura 5 – Agregados minerais utilizados na mistura



Fonte: do Autor (2016)

Obtidos todos os materiais necessários, fez-se o quarteamento dos agregados, de modo que as amostras pudessem ser levadas para o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LA-PAV) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), para a elaboração dos ensaios.

3.2.2 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70, ilustrado na Figura 6, por apresentar-se em larga escala de utilização no estado da Paraíba. Esse material foi obtido na usina de ligante asfáltico e apresenta as características como mostra o ANEXO A.

Figura 6 – Ligante asfáltico utilizado na mistura



Fonte: do Autor (2016)

3.2.3 Borracha de pneu

A borracha de pneus utilizada neste trabalho foi fornecida por uma empresa especializada em renovação de pneus, localizada no município de Bayeux, na grande João Pessoa, na Paraíba. Ela é proveniente de pneus de diversos tipos de automóveis e de caminhões, em diferentes marcas. Através de uma máquina trituradora, os pneus são moídos e separados das partes metálicas e das impurezas e depois armazenados em depósitos externos, como ilustra a Figura 7. O pó proveniente da trituração de pneu normalmente é estocado para ser doado, se não, são descartados. De acordo com informações de um funcionário da empresa, pode ser encontrada borracha natural e sintética na mistura moída.

Figura 7 – Depósito de armazenamento de borracha moída



Fonte: do Autor (2016)

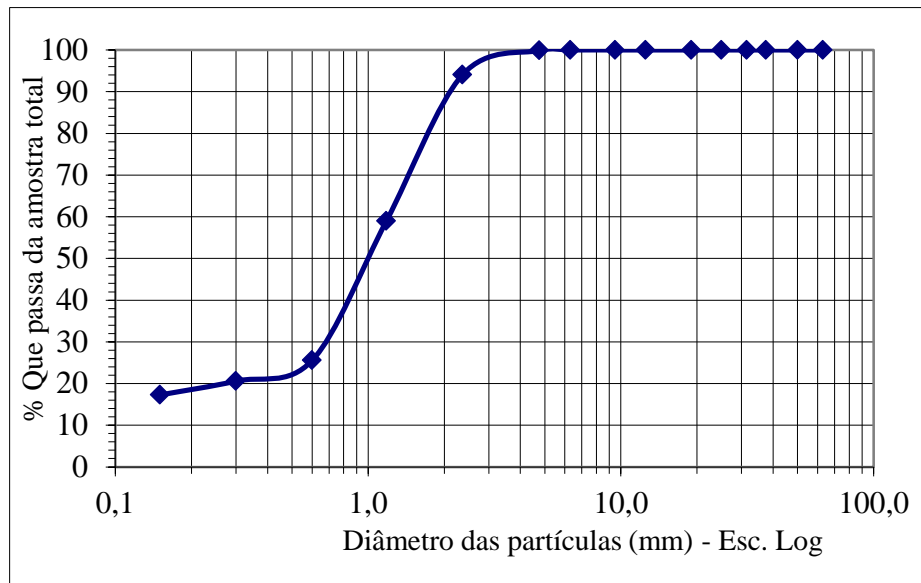
Inicialmente, desejou-se substituir o pó de pedra pela borracha com os mesmos arranjos granulométricos do pó de pedra utilizado na mistura de referência, porém, pela dificuldade de peneiramento da borracha, e pela escassez de partículas menores que 0,074 mm (#200), foi descartada a peneira #200 no processo. Assim, a Tabela 5 apresenta a granulometria da borracha adotada. A Figura 8 ilustra a curva granulométrica da borracha utilizada.

Tabela 5 – Granulometria adotada para a borracha na mistura

| Peneira (mm) | % passante |
|---------------------|-------------------|
| 4,8 | 100% |
| 2 | 98,10% |
| 0,42 | 41,53% |
| 0,3 | 34,18% |

Fonte: do Autor (2016)

Figura 8 – Curva granulométrica da borracha utilizada



Fonte: do Autor (2016)

Quanto ao aspecto visual, as borrachas da fração 4,8 mm (#4) – 2 mm (#10) possuem formato ligeiramente alongado, como ilustra a Figura 9, enquanto que as partículas das frações 2 mm – 0,42 mm (#40); 0,42 mm – 0,3 mm (#50) e passantes na 0,3 mm possuem características de tamanho bem semelhantes, o que pode ser percebido na Figura 10.

Figura 9 – Borrachas peneiradas na fração 4,8 mm – 2 mm



Fonte: do Autor (2016)

Figura 10 – Borrachas peneiradas nas frações (a) 2 mm – 0,42 mm; (b) 0,42 mm – 0,3 mm; e (3) passantes na 0,3 mm



Fonte: do Autor (2016)

Devido à inexistência de ensaios específicos, e de dados das características da borracha, a determinação da sua densidade real foi realizada a partir de três leituras do deslocamento de querosene à temperatura aproximada de 25° C. Esse procedimento foi adotado por ser de fácil execução e de precisão aceitável. Em um recipiente graduado com uma marca de 50 ml, colocou-se certa quantidade de borracha, cuja massa é conhecida. Com o auxílio de outro recipiente com 50 ml, inseriu-se o querosene no recipiente com borracha até atingir a marca dos 50 ml. Dessa forma, tem-se que o volume não inserido é o volume da borracha do recipiente. Após as três leituras, obtém-se a média das densidades encontradas, que representará a densidade adotada neste trabalho. A Tabela 6 mostra os valores encontrados para as três amostras.

Tabela 6 – Densidade da borracha

| Número da amostra | Peso da borracha (g) | Volume da borracha (ml) | Densidade da amostra (g/cm ³) | Densidade média e adotada (g/cm ³) |
|-------------------|----------------------|-------------------------|---|--|
| 1 | 10,80 | 10 | 1,08 | 1,053 |
| 2 | 10,27 | 10 | 1,03 | |
| 3 | 15,76 | 15 | 1,05 | |

Fonte: do Autor (2016)

3.2.4 Misturas modificadas com borracha

Buscou-se a incorporação da borracha seguindo a granulometria do pó de pedra, adicionadas às misturas asfálticas em 1,0; 1,5 e 2,0% do peso total da amostra, através da exclusão

de parte do pó de pedra. Seguindo a metodologia de BERTOLLO (2002), considerou-se a substituição do agregado por borracha em equivalência de volume, como mostra a equação 1.

$$\begin{aligned}
 V_{agreg.excl.} &= V_{borr.adic.} \\
 \frac{M_{ageg.excl.}}{\rho_{agreg}} &= \frac{M_{borr.adic.}}{\rho_{borr}} \\
 \Rightarrow M_{ageg.excl.} &= M_{borr.adic.} \cdot \frac{2,73}{1,053} \\
 \Rightarrow M_{ageg.excl.} &= M_{borr.adic.} \cdot 2,59
 \end{aligned} \tag{1}$$

Utilizando a equação fornecida, tem-se a Tabela 7, que apresenta as massas de borra-chas adicionadas às misturas e as respectivas massas de pó de pedra que foram excluídas.

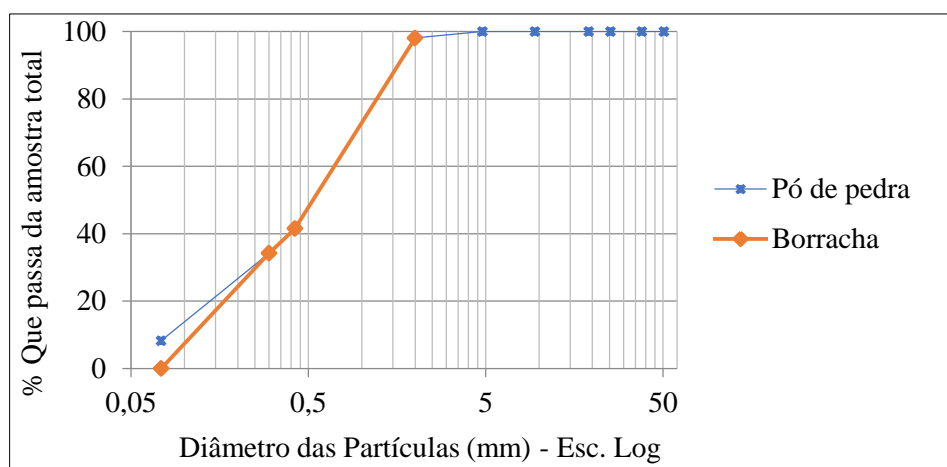
Tabela 7 – Massas adicionadas e excluídas das misturas de referência

| Material | Massa específica (g/cm ³) | Massa (g) | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | Mistura com 1% de Borracha | Mistura com 1,5% de Borracha | Mistura com 2% de Borracha |
| Borracha (adicionada) | 1,053 | 12 | 18 | 24 |
| Pó de pedra (excluído) | 2,73 | 31,12 | 46,68 | 62,24 |

Fonte: do Autor (2016)

A granulometria da borracha foi distribuída na curva granulométrica dos agregados de acordo com a Tabela 5, como ilustra a Figura 11. A Tabela 8 apresenta a composição granulométrica das misturas estudadas, sendo a Mistura 1 (M1), Mistura 2 (2) e Mistura 3 (3) representadas pela adição de 1,0%; e 1,50% e 2,0% de borracha, respectivamente.

Figura 11 – Curva granulométrica da borracha no pó de pedra



Fonte: do Autor (2016)

Tabela 8 – Composição granulométrica das misturas

| Intervalo Peneiras (mm) | Mist. Ref. Agregados (g) | M1 | | M2 | | M3 | |
|-------------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | | Massa Borracha (g) | Massa Agregados (g) | Massa Borracha (g) | Massa Agregados (g) | Massa Borracha (g) | Massa Agregados (g) |
| 25,4 – 19,1 | 4,7 | - | 4,67 | - | 4,67 | - | 4,67 |
| 19,1 – 9,5 | 235,3 | - | 235,33 | - | 235,33 | - | 235,33 |
| 9,5 – 4,8 | 487,4 | - | 487,41 | - | 487,41 | - | 487,41 |
| 4,8 – 2 | 40,6 | 0,23 | 40,00 | 0,34 | 39,70 | 0,46 | 39,41 |
| 2 – 0,42 | 242,2 | 6,79 | 224,64 | 10,18 | 215,84 | 13,58 | 207,05 |
| 0,42 – 0,3 | 32,7 | 0,88 | 30,38 | 1,32 | 29,24 | 1,76 | 28,10 |
| 0,3 – 0,074 | 115,1 | 4,10 | 146,45 | 6,15 | 141,13 | 8,20 | 135,82 |
| 0,074 – fundo | 42,0 | | | | | | |
| Massa total (g) | 1200 | 12 | 1168,89 | 18 | 1153,33 | 24 | 1137,78 |
| | | | 1180,89 | | 1171,33 | | 1161,78 |

Fonte: do Autor (2016)

3.3 Dosagem das misturas asfálticas

Para as três misturas citadas, foi realizada a dosagem *Marshall* utilizando cinco teores de ligante asfáltico. Os teores de referência foram escolhidos com base na bibliografia, como descrito em 2.3.3.2 e na mistura de referência. Assim, buscou-se analisar os efeitos causados pela borracha quanto utilizados teores maiores ao teor de projeto de referência, e que se encontrassem entre 7,5 e 9,0%. Portanto, foram escolhidos os teores de 6,0; 6,5; 7,0; 7,5 e 8,0% para serem estudados. Para cada teor de asfalto, três corpos de prova foram moldados, assim, foram ensaiados 45 corpos de prova.

3.3.1 *Preparação dos materiais*

O ligante asfáltico coletado, e inicialmente armazenado em latas metálicas, foi colocado em um outro recipiente para ser levado à estufa. O asfalto deve ser aquecido por pelo menos 4 horas, à temperatura de 150° C. A massa do ligante asfáltico utilizado foi calculada em relação às massas dos agregados minerais e da borracha, de modo que se obtivessem as proporções de asfalto adotadas e apresentadas na seção 3.3. O APÊNDICE A mostra as massas do asfalto que foram utilizadas. Os cilindros metálicos utilizados na moldagem dos corpos de prova também foram colocados em uma estufa, para serem aquecidos, evitando a perda de temperatura da mistura durante o processo de compactação.

Os agregados foram separados em sacos plásticos devidamente nomeados quanto aos teores de borracha e de asfalto, e separadas no laboratório, como ilustra a Figura 12, para que fossem levados à estufa a 165° C por, no mínimo, 12 horas, à medida em que os ensaios fossem executados. A separação foi realizada de acordo com as massas calculadas, por corpo de prova, seguindo a curva granulométrica dos agregados. Os resultados encontram-se no APÊNDICE A.

Figura 12 – Preparação dos agregados para a moldagem dos corpos de prova



Fonte: do Autor (2016)

A borracha foi inicialmente separada de acordo com a sua granulometria, nas quantidades calculadas e apresentadas no APÊNDICE A. Em seguida, ela foi separada segundo o

seu teor de incorporação para cada teor de asfalto, em sacos plásticos nomeados quanto aos teores de borracha e de asfalto, como ilustra a Figura 13, para que pudessem ser acrescidas aos agregados à medida em que os ensaios fossem realizados.

Figura 13 – Preparação da borracha para a elaboração dos corpos de prova

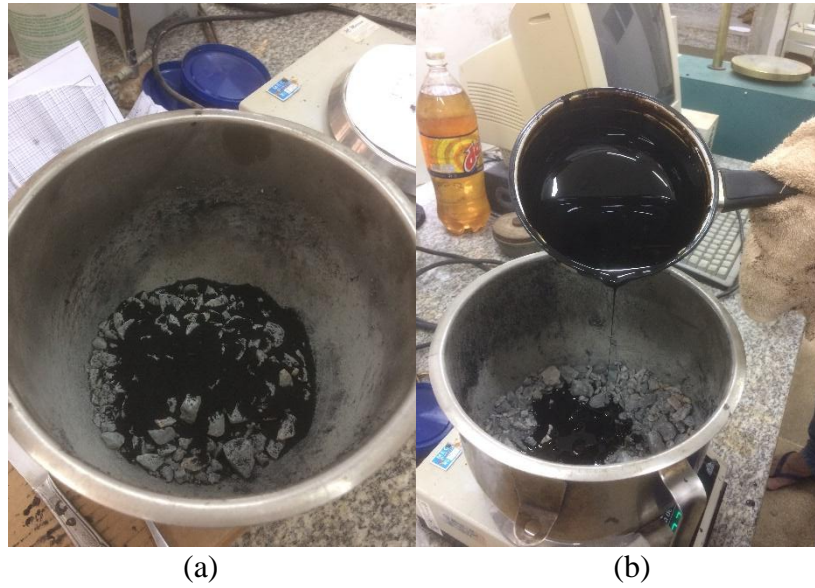


Fonte: do Autor (2016)

3.3.2 *Moldagem dos corpos de prova*

A moldagem dos corpos de prova foi elaborada conforme a norma DNER-ME 043/95. Os agregados foram retirados da estufa e imediatamente colocados no recipiente onde os materiais seriam misturados. A mistura do agregado mineral com a borracha foi realizada manualmente, por cerca de 30 segundos. Buscou-se incorporar a borracha à medida em que se misturava, ou de forma que houvesse o seu espalhamento no recipiente, para evitar a concentração da borracha na mistura. Em seguida, retirou-se o ligante asfáltico da estufa, para que fosse inserido o ligante asfáltico na proporção calculada, controlada pela balança. A homogeneização das misturas foi realizada em menos de três minutos, desde a retirada dos agregados da estufa à moldagem, para evitar a perda de calor dos materiais e a consequente queda de densidade da mistura. As Figura 14 (a) e (b) ilustram a incorporação dos materiais para a mistura asfáltica e a Figura 15 apresenta a homogeneização da mistura.

Figura 14 – Incorporação da borracha moída (a); Incorporação do asfalto (b)



Fonte: do Autor (2016)

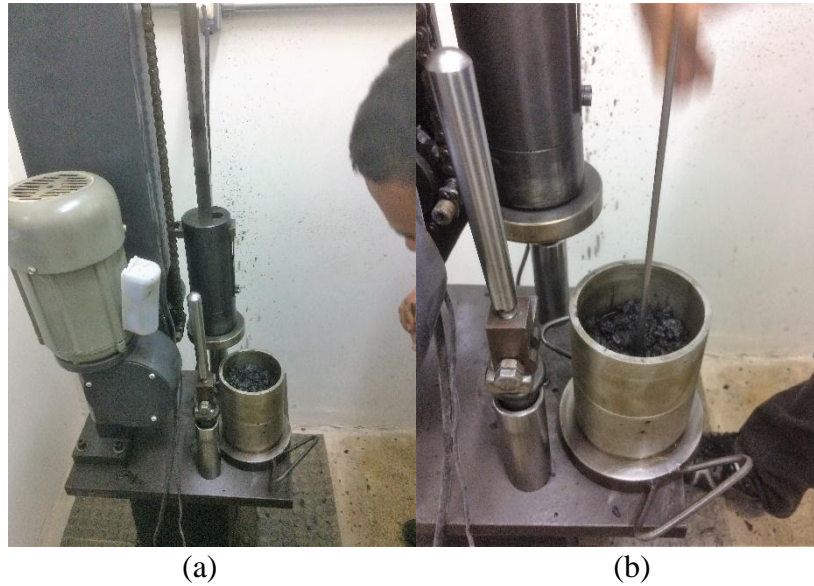
Figura 15 – Homogeneização da mistura



Fonte: do Autor (2016)

Realizadas as misturas e colocando-as dentro dos cilindros ainda aquecidos, procedeu-se a compactação das misturas asfálticas no compactador *Marshall*. Como é previsto no procedimento, acomoda-se a mistura por meio de quinze golpes de espátula aplicados no interior e ao redor do molde e dez golpes no centro de massa. As Figura 16 (a) e (b) ilustram a moldagem dos corpos de prova.

Figura 16 – Compactador Marshall (a); Acomodação da mistura no molde (b)



Fonte: do Autor (2016)

Após a compactação de 45 corpos de prova, eles foram separados para o desmolde e devidamente nomeados, como ilustra a Figura 17.

Figura 17 – Corpos de prova moldados



Fonte: do Autor (2016)

Dois dias após a moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, pesados e tiveram suas espessuras medidas, apresentado pelo APÊNDICE B. A Figura 18 (a) ilustra o desmolde dos corpos de prova, que foram devidamente nomeados, como mostra a Figura 18 (b).

Figura 18 – Desmolde do corpo de prova (a); Corpos de prova desmoldados (b)



(a)

(b)

Fonte: do Autor (2016)

3.3.3 Parâmetros Marshall

Com os resultados das medidas e massas de cada corpo de prova, seguiu-se para o cálculo dos parâmetros volumétricos. Assim, a massa específica aparente da mistura compactada foi dada pela equação 2.

$$Gmb = \frac{M_s}{M_s - M_{s_{sub}}} \times 0,9971 \quad (2)$$

Em que:

M_s = massa seca do corpo de prova, g;

$M_{s_{sub}}$ = massa seca do corpo de prova e posteriormente submerso em água, g;

0,9971 = massa específica da água a 25 °C, g/cm³.

A massa específica máxima teórica foi dada pela ponderação entre as massas dos constituintes da mistura asfáltica ensaiada e calculada pela equação 3.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%b}{G_b}} \quad (3)$$

Em que:

$\%a$ = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica;

$\%Ag$, $\%Am$, $\%b$ = porcentagens do agregado graúdo, do agregado miúdo e da borracha, respectivamente, expressas em relação à massa total da mistura asfáltica;

G_a , G_{Ag} , G_{Am} , G_b = massas específicas reais do asfalto, do agregado graúdo, do agregado miúdo e da borracha, respectivamente.

A partir dos resultados obtidos para a DMT e Gmb , calculou-se a porcentagem de volume de vazios dos corpos de prova, utilizando a equação 4.

$$Vv(\%) = \frac{DMT - Gmb}{DMT} \times 100 \quad (4)$$

Conhecendo o Gmb , o $\%a$ e G_a , calculou-se a porcentagem de vazios com betume, através da equação 5.

$$VCB(\%) = \frac{Gmb \times \%a}{G_a} \quad (5)$$

Calculados os Vv e VCB , foi possível obter a porcentagem de vazios do agregado mineral utilizando a equação 6.

$$VAM(\%) = Vv + VC \quad (6)$$

Finalmente, com o VCB e o VAM , utilizou-se a equação 7 para calcular a relação betume/vazios.

$$RBV(\%) = \frac{VCB}{VAM} \times 100 \quad (7)$$

Assim, calculados os parâmetros para todos os corpos de prova, como apresentado no APÊNDICE B, foi possível elaborar os gráficos que relacionam as médias dos parâmetros ao teor de asfalto utilizado na mistura.

Os corpos de prova, depois de pesados e medidos, foram levados à estufa por duas horas, à temperatura de 60 °C, para serem ensaiados. Foi utilizada a norma DNER-ME 043/95, que se refere ao modo pelo qual são determinadas a estabilidade e a fluência de misturas betuminosas através do ensaio *Marshall*. A Figura 19 ilustra o corpo de prova durante ensaio *Marshall* (a) e após o seu rompimento (b).

Figura 19 – Execução do ensaio *Marshall* (a); Corpos de prova rompidos (b)



(a)

(b)

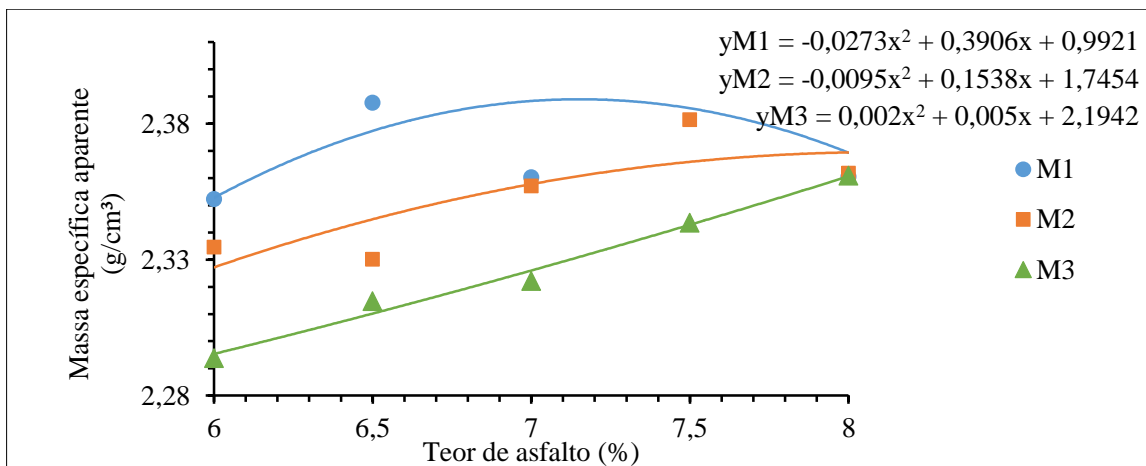
Fonte: do Autor (2016)

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados encontrados para a dosagem *Marshall*, em que são analisadas as diferenças entre os parâmetros para os três teores de borracha. As análises são baseadas nas tendências do comportamento das misturas asfálticas quando há incorporação da borracha, vistas no referencial teórico, e na mistura de referência adotada. Ainda, consideram-se os limites adotados em normas.

A partir da composição das misturas apresentada no ANEXO A e seguindo a metodologia prevista, realizou-se a dosagem *Marshall*, obtendo-se os parâmetros de massa específica aparente, volume de vazios, vazios do agregado mineral, relação betume vazios, estabilidade *Marshall* e fluência. As Figura 20 a Figura 25 ilustram os gráficos gerados a partir dos parâmetros calculados para os três teores de borracha. A Figura 20 apresenta os resultados para a massa específica aparente.

Figura 20 – Massa específica aparente

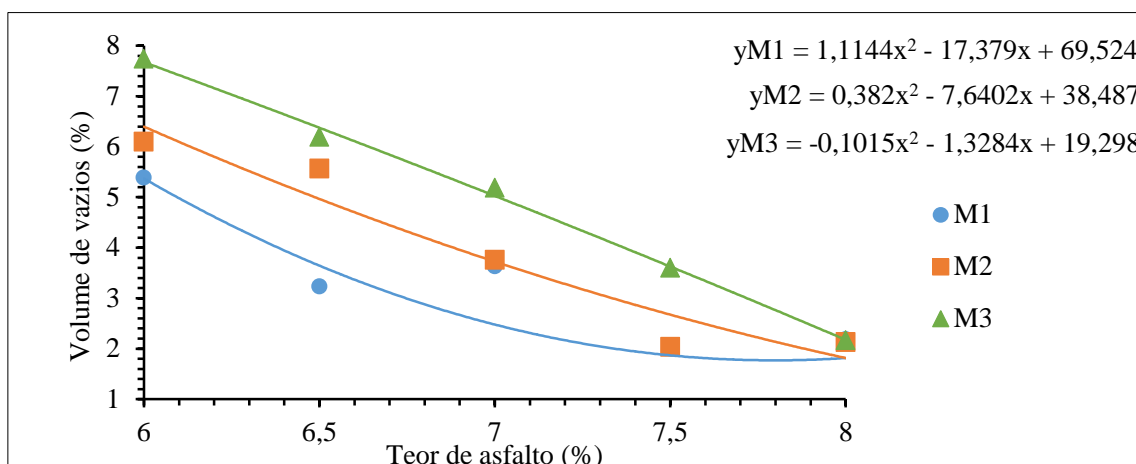


Fonte: do Autor (2016)

Verificou-se a diminuição dos valores das massas específicas com o aumento do teor de borracha na mistura, ou seja, as misturas tornaram-se menos densas, mas não haverá consideração sobre perda nas propriedades mecânicas.

A Figura 21 ilustra os volumes de vazios das misturas.

Figura 21 – Volume de vazios



Fonte: do Autor (2016)

O volume de vazios das misturas tende a aumentar significativamente com o aumento do teor de borracha. Geralmente, as misturas com elevados índices de vazios apresentam menores resistências ao aparecimento de trincas por fadiga, porém o seu valor não deve ser inferior a 3%, para evitar a exsudação (BERTOLLO, 2002). A norma DNIT 031/2004 – ES, segundo ANEXO B, apresenta os limites para o volume de vazios, quando a mistura é utilizada para a camada de rolamento e de ligação. Considerando sua utilização na camada de rolamento, tem-se que os volumes de vazios devem se encontrar entre 3 e 5%. A Tabela 9 apresenta os teores de asfalto relacionados aos limites de V_v da mistura.

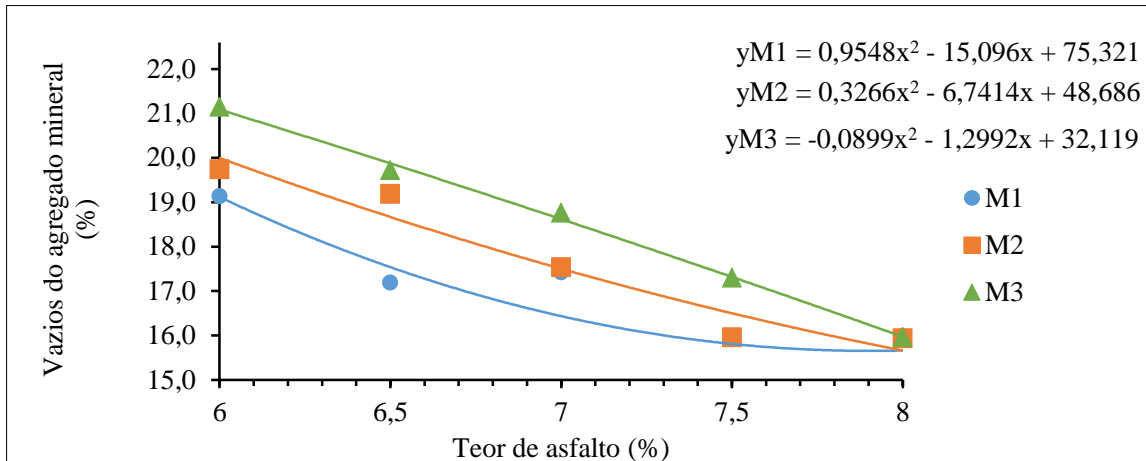
Tabela 9 – Teores de asfalto para valores limites do volume de vazios

| Mistura | Teor de asfalto (%) | |
|---------|---------------------|-------------|
| | $V_v = 3\%$ | $V_v = 5\%$ |
| M1 | 6,75 | 6,09 |
| M2 | 7,33 | 6,49 |
| M3 | 7,72 | 7,01 |

Fonte: do Autor (2016)

A Figura 22 apresenta os resultados encontrados para os vazios do agregado mineral.

Figura 22 – Vazios do agregado mineral

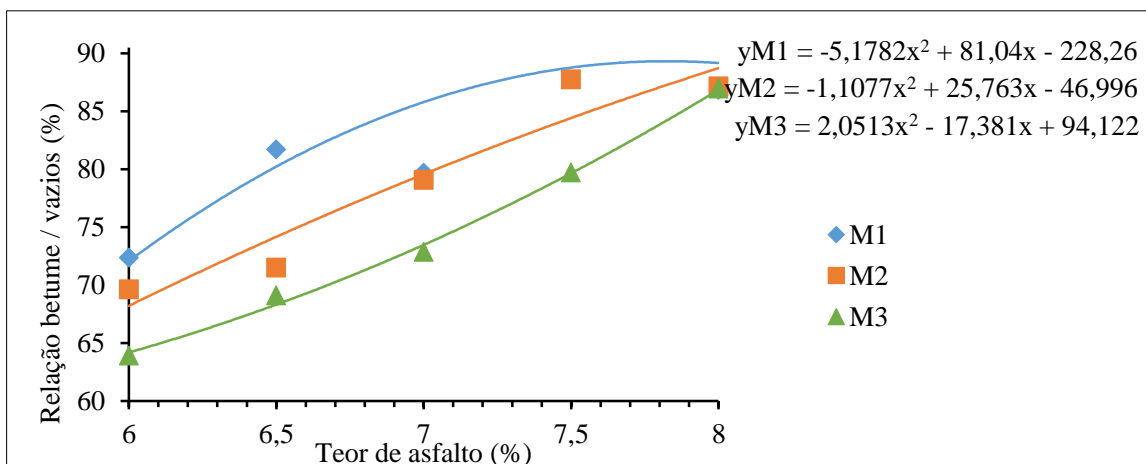


Fonte: do Autor (2016)

Os resultados mostraram a tendência à diminuição dos vazios do agregado mineral com o decréscimo do teor de borracha. De modo geral, valores de VAM muito baixos (<13%) devem ser evitados, dependendo do tamanho nominal máximo do agregado. Neste caso, considerando o ANEXO C, vê-se que o VAM mínimo a ser considerado é de 15%. Todas as curvas apresentaram valores satisfatórios.

A Figura 23 apresenta os resultados obtidos para a relação betume/vazios.

Figura 23 – Relação betume/vazios



Fonte: do Autor (2016)

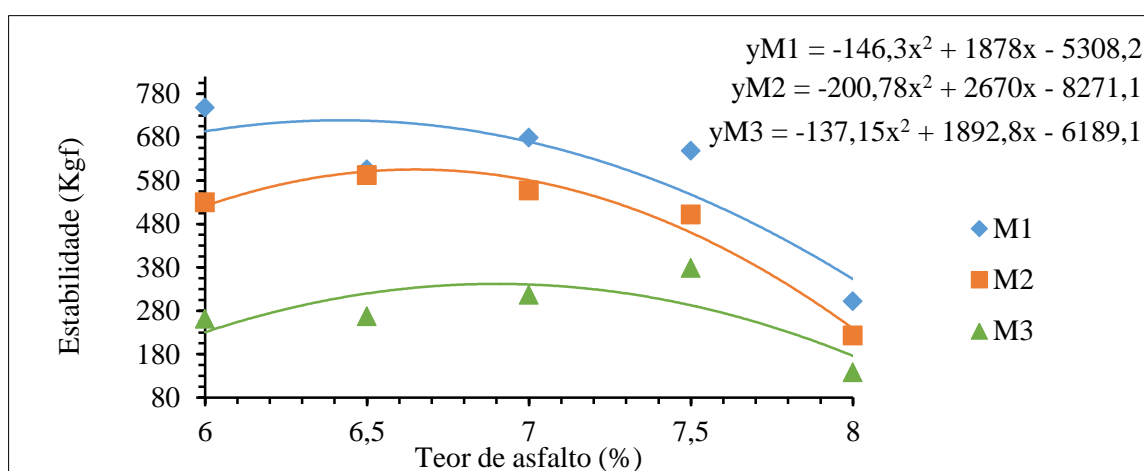
A relação betume/vazios para misturas com menores teores de borracha tende a apresentar maiores valores. O ANEXO B apresenta os limites a serem considerados e, considerando a sua aplicação na camada de rolamento e as equações fornecidas pelo gráfico da Figura 23, tem-se a Tabela 10.

Tabela 10 – Teores de asfalto para valores limites da relação betume/vazios

| Mistura | Teor de asfalto (%) | |
|---------|---------------------|-----------|
| | RBV = 75% | RBV = 82% |
| M1 | 6,19 | 6,68 |
| M2 | 6,62 | 7,30 |
| M3 | 7,41 | 7,91 |

Fonte: do Autor (2016)

A Figura 24 mostra os resultados obtidos da estabilidade *Marshall*.

Figura 24 – Estabilidade *Marshall*

Fonte: do Autor (2016)

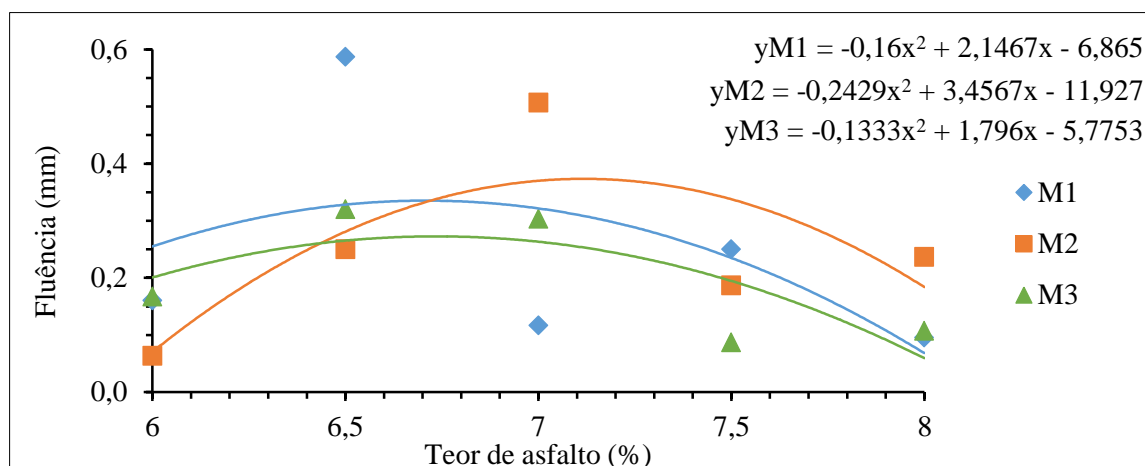
Percebe-se uma significativa queda da estabilidade com o aumento do teor de borracha. Como explanado na seção 2.4, baixos valores da estabilidade eram esperados. FAXINA (2006) explica que a borracha e o asfalto são, na maioria das vezes, dois materiais que não são quimicamente compatíveis. Logo, durante a mistura, a borracha não se funde adequadamente ao ligante asfáltico, acarretando em menores resultados para a estabilidade quando comparado a misturas sem adição de borracha. A Tabela 11 apresenta os teores de asfalto relacionados ao valor limite da estabilidade *Marshall*.

Tabela 11 – Teores de asfalto para valor limite de estabilidade *Marshall*

| Mistura | Teor de asfalto (%) |
|---------|---------------------|
| | EM = 500kgf |
| M1 | 7,64 |
| M2 | 7,37 |
| M3 | - |

Fonte: do Autor (2016)

A Figura 25 ilustra a variação da fluência obtida pelo ensaio *Marshall*.

Figura 25 – Fluência *Marshall*

Fonte: do Autor (2016)

Verifica-se que a variação de borracha nas misturas apresentou diferenças significativas de fluência entre si, com elevada dispersão dos resultados. Em relação à mistura de referência, ASSIS (2015) apresentou valores de fluência superiores às misturas M1, M2 e M3. SPECHT (2004) explica que o estado de tensões obtido pelo ensaio *Marshall* é uma das maiores críticas ao método, assim, é mais comum se considerar a relação entre os valores da estabilidade e da fluência.

O teor de projeto das misturas foi definido conforme realizado por ASSIS (2015), ou seja, a partir dos valores da estabilidade, relação betume/vazios e do volume de vazios, conforme APÊNDICE B. Fixou-se o valor de $Vv = 3,53\%$ com base na Tabela 4, para encontrar o teor de asfalto correspondente. Com o teor encontrado, os demais parâmetros foram verificados com base no ANEXO B. A Tabela 12 apresenta o resultado da dosagem *Marshall* para as misturas estudadas.

Tabela 12 – Resultado da dosagem *Marshall*

| Misturas | Teor de projeto (%) | G_{mb} (g/cm^3) | V_v (%) | V_{AM} (%) | RBV (%) | Estabilidade (kgf) | Fluência (mm) |
|----------------|---------------------|-----------------------|-----------|--------------|-----------|--------------------|---------------|
| M1 | 6,54 | 2,38 | 3,53 | 15,43 | 80,26 | 716,44 | 0,33 |
| M2 | 7,09 | 2,36 | 3,53 | 17,31 | 79,98 | 566,44 | 0,37 |
| M3 | 7,53 | 2,35 | 3,53 | 17,24 | 79,55 | 287,16 | 0,19 |
| Limites | - | - | 3-5% | - | 75-82% | >500 kgf | - |

Fonte: do Autor (2016)

Os resultados da Tabela 12 mostram que a mistura M3 não apresenta resultados satisfatórios, pois a estabilidade encontrada é menor 500 kgf, que é o mínimo permitido por nor-

ma e como pode ser observado na Figura 24. A mistura M2 apresenta teor de projeto de 7,09%, enquanto que o teor de projeto da mistura M1 é de 6,54%.

Por questões econômicas, adota-se a mistura M1 como o resultado principal deste trabalho para ser comparada aos parâmetros da mistura de referência – apresentados na Tabela 4 – pois ela apresenta menor teor de projeto que a mistura M2. Assim, tem-se a Tabela 13.

Tabela 13 – Resultado comparativo dos parâmetros *Marshall*

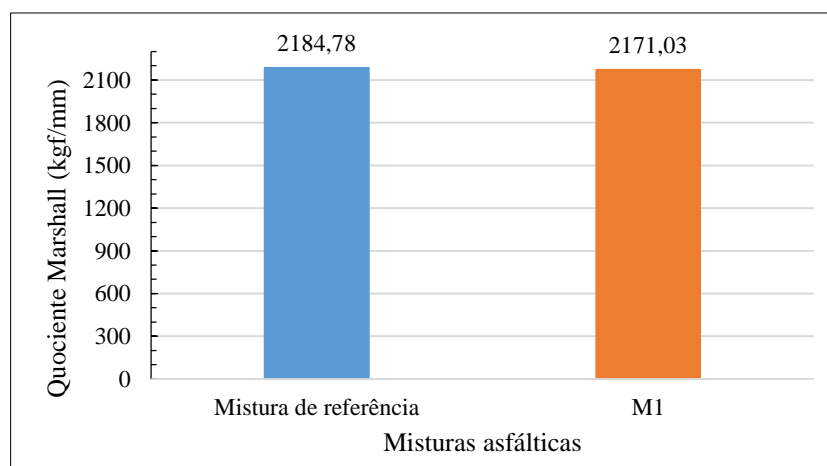
| Mistura | Teor de projeto (%) | Estabilidade (kgf) | <i>Gmb</i> (g/cm ³) | <i>Vv</i> (%) | <i>VAM</i> (%) | <i>RBV</i> (%) | <i>f</i> (10 ⁻¹ mm) |
|------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------|----------------|----------------|--------------------------------|
| Referência | 4,8 | 1005 | 2,44 | 3,53 | 15 | 76,67 | 4,6 |
| M1 | 6,5 | 716,44 | 2,38 | 3,53 | 15,43 | 80,26 | 3,3 |

Fonte: do Autor (2016)

A partir dos valores de estabilidade e de fluência obtidos para a mistura, determinou-se o quociente *Marshall* (MQ), que é dada pela equação 8. Os resultados comparativos com a mistura de referência são mostrados na Figura 26.

$$MQ(Kgf/mm) = \frac{EM}{FM} \quad (8)$$

Figura 26 – Comparativo do quociente *Marshall* das misturas



Fonte: do Autor (2016)

Um alto valor do MQ representa uma tendência de maior rigidez nas misturas. Vê-se, portanto, que a mistura modificada por borracha apresentou uma tendência à apresentar uma menor rigidez (e conseqüente melhoria nas propriedades elásticas), quando comparada à mistura de referência, fato que pode ser justificado pela flexibilidade que a borracha confere à mistura. BERTOLLO (2002) confirmou, em seus estudos, o decréscimo do MQ para misturas modificadas com borracha.

Entretanto, para obter uma confirmação desse aspecto, é necessária a realização de outros ensaios, como o ensaio de resiliência, *flow number* (FN) e o ensaio de fadiga. Comparativamente, um alto valor de MQ pode estar relacionado com um alto valor de FN, como verificado por ASSIS (2015).

5 CONCLUSÕES

Face às questões discutidas neste trabalho, ao método de trabalho adotado e após uma análise dos resultados obtidos com o ensaio *Marshall*, algumas considerações podem ser feitas.

Por não ter sido fornecida a densidade da borracha, foi necessário adotar um método não normatizado para a sua obtenção (ver seção 3.2.3). Considerou-se, portanto, que os valores encontrados foram aproximadamente os mesmos que seriam encontrados se tivesse sido realizada a picnometria de hélio, por exemplo. Entretanto, ainda pode ser considerado um procedimento válido para o estudo.

Para um mesmo limite de 75% da relação betume/vazios, as misturas com maiores teores de borracha necessitaram de maiores quantidades de asfalto, o que se explica pelos grandes valores de volume de vazios encontrados nessas misturas.

Com o aumento do teor de borracha nas misturas, pode-se constatar que, o formato das curvas de massa específica aparente, volume de vazios, vazios do agregado mineral e a relação betume/vazios mudam, indicando a necessidade de adição de uma maior quantidade de asfalto para que a curva seja parabólica.

Dentre as três misturas estudadas, apenas a mistura M3 não satisfaz a condição da estabilidade mínima requerida por norma, para nenhum corpo de prova. Para a mistura de referência estudada, a incorporação de 2,0% de borracha resultou em uma exagerada flexibilidade do corpo de prova, o que pode ser observado na Figura 19 (b). Conclui-se que as proporções adotadas para a M3 não foram adequadas.

De modo geral, menores quantidades de borracha adicionadas às misturas apresentaram os melhores resultados para os parâmetros da dosagem *Marshall*. Embora esse método de dosagem ainda seja muito questionado, ainda é considerado um ensaio de referência. Além disso, este trabalho mostrou que a incorporação de borracha de pneus inservíveis em CAUQ pode ser uma alternativa viável para a reciclagem desses resíduos, e que ainda há bastante informação para ser estudada e analisada.

REFERÊNCIAS

ASSIS, S. R. H. **Utilização de agregados de rochas calcárias em misturas asfálticas usadas a quente**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – ANIP. **Produção e Vendas 2015**. Disponível em: <http://www.anip.com.br/arquivos/producao_vendas.pdf>. Acesso em: 10 set. 2016.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3ª. Reimpressão. PETROBRÁS - Petróleo Brasileiro S/A / ABEDA - Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto. Rio de Janeiro, 2010.

BERTOLLO, S. A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2002.

BERTOLLO, S. A. M.; J. L. FERNANDES JÚNIOR; L. B. BERNUCCI; E. MOURA. **Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica Densa Modificada com Adição de Borracha**, *Transportes*, v. 10, n. 1, p. 65-83, 2002.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. **Resolução 558/80 de 15 de abril de 1980**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 abr. 1980. Disponível em: <<https://www.diariodasleis.com.br/busca/exibmlink.php?numlink=225487>> Acesso em: 30 out. 2016.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30102.xml>>. Acesso em: 30 set. 2016.

CURY, M. V. Q., MURTA, A. L. S., FIGUEIREDO, L. H. F., MONTENEGRO, L.C.S. **Análise socioeconômica e ambiental para o uso de asfalto emborrachado na construção de rodovias**. In: Simpósio Brasileiro Sobre Estradas e a Interface Ambiental. Foz do Iguaçu. Anais. Foz do Iguaçu: SESINAM, p. 1-12.2, 2002

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3. Ed. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (IPR. Publ. 719). Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 005/2003 – TER**. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos – Terminologia. 12 p. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **DNIT 031/2004 – ES**. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviços. 13 p. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **DNIT 111/2009 – EM**. Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de material. 6 p. Rio de Janeiro, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRUTURAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043/95**. Misturas betuminosas a quente – ensaio *Marshall* – Método de ensaio. 11 p. Rio de Janeiro, 1995.

EPPS, Jon A. *Uses of recycled rubber tires in highways*. *Transportation Research Board*, 1994.

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

FAXINA, A. L. **Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usado a quente empregando ligante tipo asfalto-borracha**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FHWA (1993) *Crumb Rubber Modifier – Design Procedures and Construction Practices. Workshop Notes*. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Publication N° FHWA-SA-93-011.

GONÇALVES, F. P. **Estudo do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil na Área de Geotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2002.

HANSON, D. I., FOO, K. Y., BROWN, E. R., DENSON, R. *Evaluation and characterization of a rubber-modified hot mix asphalt pavement*. *Transportation Research Record*, n. 1436, p. 98-107, 1994.

MACHADO, A. F. A. **Análise da Interação betume borracha em misturas betuminosas com borracha reciclada de pneus pelo processo a seco**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia. Universidade do Minho, Guimarães, 2013.

MARTINS, H. A. F. **A Utilização da Borracha de Pneus na Pavimentação Asfáltica**. São Paulo, 2004. 115 f. Monografia (Graduação). Curso de Engenharia Civil da Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2004.

NETO, S.A.D, FARIAS, M. M., PAIS, J. C., PEREIRA, P. A. A., SANTOS, L. P. *Properties of asphalt-rubber binders related to characteristics of the incorporated crumb rubber*. *Asphalt Rubber 2003 Conference*, Brasília, Brasil, 2003, p. 297-310.

NEVES FILHO, C. L. D. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ODA, S.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação**. *Acta Scientiarum. Technology*, Maringá, v. 23, n. 6, p. 1589-1599, 2001.

PARAIBA. **Lei nº 10.164, de 25 de novembro de 2013**. Diário Oficial do Estado da Paraíba, p. 2, João Pessoa, PB, 26 nov. 2013. Disponível em: <<http://static.paraiba.pb.gov.br/2013/11/Di%C3%A1rio-Oficial-26.11.2013.pdf>> Acesso em: 30 set. 2016.

PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco)**. Dissertação (Mestrado). Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

RIO DE JANEIRO. **Decreto nº 34.873, de 6 de dezembro de 2011**. Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMAC). Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/3372233/dlfe-261903.pdf/decretomunicipal3.4.8.7.3.de0.6.dedezembrode2.0.1.1...pdf>> Acesso em: 30 set. 2016.

SÃO PAULO (Estado). **Lei nº 14.691, de 06 de janeiro de 2012**. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, 7 jan. 2012. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2012/lei-14691-06.01.2012.html>> Acesso em: 10 out. 2016.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: PINI vol. 1. 1997.

SOARES, R. A.; ASSIS, E. M. **O uso da Borracha de Pneus na Pavimentação como uma Alternativa Ecologicamente Viável**. 2008. 15 p. Universidade Católica de Salvador, Salvador, BA, 2008.

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

WAY, George. **History of Asphalt Rubber in Arizona**. 2012 Arizona Pavements/Materials Conference. Disponível em: <<http://pavement.engineering.asu.edu/wordpress/wp-content/uploads/2012/12/Way.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2016.

ZANZOTTO, L.; KENNEPOHL, G. *Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt*. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1530, p. 51-58, 1996.

APÊNDICE A – Ajuste das massas das misturas M1, M2 E M3

As proporções dos agregados da mistura de referência, ou seja, da brita 19, da brita 12 e do pó de pedra são 21, 30 e 49%, respectivamente. Para realizar a dosagem *Marshall* e a incorporação da borracha na mistura, deve-se fazer o ajuste nos percentuais das massas. Esse ajuste é realizado a partir dos teores de CAP escolhidos, por meio da equação 9 e apresentados na Tabela 14.

$$\%n = \%n^* \times (100 - T') - \%n_{excluído} \quad (9)$$

Em que:

$\%n$ = porcentagem em massa dos agregados corrigida;

$\%n^*$ = porcentagem em massa dos agregados da mistura de referência;

$\%n_{excluído}$ = porcentagem da massa do agregado excluído, com base na equação 1;

T' = teor de asfalto.

A massa da borracha adicionada é constante para cada teor de borracha e seus respectivos teores de asfalto. Assim, 1% representa a adição de 12 g de borracha, 1,5% representa 18 g e 2,0%, 24 g. Portanto, tem-se a Tabela 15.

Tabela 14 – Ajuste percentual das misturas M1, M2 e M3

| M1 | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teor de asfalto, % | 6,00 | 6,50 | 7,00 | 7,50 | 8,00 |
| Brita 19, % | 19,74 | 19,64 | 19,53 | 19,43 | 19,32 |
| Brita 12, % | 28,20 | 28,05 | 27,90 | 27,75 | 27,60 |
| Pó de pedra, % | 43,47 | 43,22 | 42,98 | 42,73 | 42,49 |
| Borracha, % | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| M2 | | | | | |
| Teor de asfalto, % | 6,00 | 6,50 | 7,00 | 7,50 | 8,00 |
| Brita 19, % | 19,74 | 19,64 | 19,53 | 19,43 | 19,32 |
| Brita 12, % | 28,20 | 28,05 | 27,90 | 27,75 | 27,60 |
| Pó de pedra, % | 42,17 | 41,92 | 41,68 | 41,43 | 41,19 |
| Borracha, % | 1,500 | 1,500 | 1,500 | 1,500 | 1,500 |
| M3 | | | | | |
| Teor de asfalto, % | 6,00 | 6,50 | 7,00 | 7,50 | 8,00 |
| Brita 19, % | 19,74 | 19,64 | 19,53 | 19,43 | 19,32 |
| Brita 12, % | 28,20 | 28,05 | 27,90 | 27,75 | 27,60 |
| Pó de pedra, % | 40,87 | 40,63 | 40,38 | 40,14 | 39,89 |
| Borracha, % | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 |

Fonte: do Autor (2016)

Tabela 15 – Ajuste das massas das misturas M1, M2 e M3

| M1 | | | | | |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Teor de asfalto, % | 6,00 | 6,50 | 7,00 | 7,50 | 8,00 |
| Brita 19, g | 236,88 | 235,62 | 234,36 | 233,10 | 231,84 |
| Brita 12, g | 338,40 | 336,60 | 334,80 | 333,00 | 331,20 |
| Pó de pedra, g | 521,60 | 518,66 | 515,72 | 512,78 | 509,84 |
| Borracha, g | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 |
| Asfalto, g | 72,00 | 78,00 | 84,00 | 90,00 | 96,00 |
| M2 | | | | | |
| Teor de asfalto, % | 6,00 | 6,50 | 7,00 | 7,50 | 8,00 |
| Brita 19, g | 236,88 | 235,62 | 234,36 | 233,10 | 231,84 |
| Brita 12, g | 338,40 | 336,60 | 334,80 | 333,00 | 331,20 |
| Pó de pedra, g | 506,04 | 503,10 | 500,16 | 497,22 | 494,28 |
| Borracha, g | 18,00 | 18,00 | 18,00 | 18,00 | 18,00 |
| Asfalto, g | 72,00 | 78,00 | 84,00 | 90,00 | 96,00 |
| M3 | | | | | |
| Teor de asfalto, % | 6,00 | 6,50 | 7,00 | 7,50 | 8,00 |
| Brita 19, g | 236,88 | 235,62 | 234,36 | 233,10 | 231,84 |
| Brita 12, g | 338,40 | 336,60 | 334,80 | 333,00 | 331,20 |
| Pó de pedra, g | 490,48 | 487,54 | 484,60 | 481,66 | 478,72 |
| Borracha, g | 24,00 | 24,00 | 24,00 | 24,00 | 24,00 |
| Asfalto, g | 72,00 | 78,00 | 84,00 | 90,00 | 96,00 |

Fonte: do Autor (2016)

APÊNDICE B – Resultados da dosagem *Marshall*

Calculam-se os parâmetros *Marshall* das misturas M1, M2 e M3 de acordo com as equações fornecidas pela seção 3.3.3 e utilizando as medidas dos corpos de prova conforme mostra a Tabela 16 – cada corpo de prova foi medido três vezes e, assim, considerou-se média entre esses valores. As Tabela 17 a Tabela 19 apresentam os resultados obtidos.

A Tabela 20 apresenta os resultados do ensaio de compressão diametral. Os valores das estabilidades encontradas são corrigidos multiplicando-os por um fator, conforme mostra o ANEXO D.

Observando a Tabela 16, vê-se que há um corpo de prova com 8% de asfalto e 1% de borracha que foi desconsiderado neste trabalho, devido a um erro ocorrido na medição das massas de seus agregados.

Tabela 16 – Espessuras médias dos corpos de prova (mm)

| Teor de asfalto/ Teor de borracha, % | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 62,0 | 61,2 | 61,8 | 60,8 | 61,7 |
| | 61,8 | 60,7 | 61,3 | 61,7 | 62,4 |
| | 62,6 | 61,1 | 62,5 | 59,9 | - |
| 1,5 | 62,2 | 61,1 | 61,3 | 60,8 | 61,6 |
| | 62,0 | 61,1 | 61,1 | 61,1 | 60,6 |
| | 61,5 | 61,2 | 61,4 | 61,5 | 62,5 |
| 2,0 | 62,7 | 61,6 | 61,5 | 61,1 | 61,8 |
| | 62,0 | 61,2 | 62,1 | 61,3 | 61,2 |
| | 62,6 | 61,1 | 61,9 | 61,2 | 61,6 |

Fonte: do Autor (2016)

Tabela 17 – Massas específicas aparentes (DMT) das misturas M1, M2 e M3

| Teor de asfalto, % | 6,00 | 6,50 | 7,00 | 7,50 | 8,00 |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| DMT (g/cm³) | 2,486 | 2,467 | 2,449 | 2,431 | 2,413 |

Fonte: do Autor (2016)

Tabela 18 – Massas específicas das misturas compactadas

| Teor de borracha, % | 1 | | 1,5 | | 2 | | 2 | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Teor de asfalto, % | 6 | | | | | | | | |
| M_S , g | 1175,0 | 1185,0 | 1180,0 | 1165,0 | 1165,0 | 1160,0 | 1160,0 | 1155,0 | 1160,0 |
| $M_{S_{sub}}$, g | 670,0 | 685,0 | 680,0 | 670,0 | 660,0 | 665,0 | 655,0 | 650,0 | 655,0 |
| V , cm ³ | 505,0 | 500,0 | 500,0 | 495,0 | 505,0 | 495,0 | 505,0 | 505,0 | 505,0 |
| Gmb , g/cm ³ | 2,33 | 2,37 | 2,36 | 2,35 | 2,31 | 2,34 | 2,30 | 2,29 | 2,30 |
| Gmb médio, g/cm ³ | 2,35 | | 2,33 | | 2,29 | | | | |
| Teor de asfalto, % | 6,5 | | | | | | | | |
| M_S , g | 1165,0 | 1175,0 | 1170,0 | 1165,0 | 1165,0 | 1165,0 | 1160,0 | 1150,0 | 1150,0 |
| $M_{S_{sub}}$, g | 675,0 | 685,0 | 680,0 | 665,0 | 660,0 | 670,0 | 655,0 | 650,0 | 660,0 |
| V , cm ³ | 490,0 | 490,0 | 490,0 | 500,0 | 505,0 | 495,0 | 505,0 | 500,0 | 490,0 |
| Gmb , g/cm ³ | 2,38 | 2,40 | 2,39 | 2,33 | 2,31 | 2,35 | 2,30 | 2,30 | 2,35 |
| Gmb médio, g/cm ³ | 2,39 | | 2,33 | | 2,32 | | | | |
| Teor de asfalto, % | 7,0 | | | | | | | | |
| M_S , g | 1165,0 | 1165,0 | 1175,0 | 1150,0 | 1160,0 | 1155,0 | 1150,0 | 1140,0 | 1135,0 |
| $M_{S_{sub}}$, g | 670,0 | 670,0 | 680,0 | 660,0 | 670,0 | 665,0 | 660,0 | 645,0 | 645,0 |
| V , cm ³ | 495,0 | 495,0 | 495,0 | 490,0 | 490,0 | 490,0 | 490,0 | 495,0 | 490,0 |
| Gmb , g/cm ³ | 2,35 | 2,35 | 2,37 | 2,35 | 2,37 | 2,36 | 2,35 | 2,30 | 2,32 |
| Gmb médio, g/cm ³ | 2,36 | | 2,36 | | 2,32 | | | | |
| Teor de asfalto, % | 7,5 | | | | | | | | |
| M_S , g | 1160,0 | 1165,0 | 1160,0 | 1150,0 | 1155,0 | 1160,0 | 1150,0 | 1145,0 | 1150,0 |
| $M_{S_{sub}}$, g | 690,0 | 670,0 | 680,0 | 670,0 | 670,0 | 670,0 | 660,0 | 655,0 | 660,0 |
| V , cm ³ | 470,0 | 495,0 | 480,0 | 480,0 | 485,0 | 490,0 | 490,0 | 490,0 | 490,0 |
| Gmb , g/cm ³ | 2,47 | 2,35 | 2,42 | 2,40 | 2,38 | 2,37 | 2,35 | 2,34 | 2,35 |
| Gmb médio, g/cm ³ | 2,41 | | 2,38 | | 2,34 | | | | |
| Teor de asfalto, % | 8,0 | | | | | | | | |
| M_S , g | 1165,0 | 1160,0 | - | 1155,0 | 1145,0 | 1160,0 | 1150,0 | 1145,0 | 1140,0 |
| $M_{S_{sub}}$, g | 675,0 | 665,0 | - | 665,0 | 660,0 | 670,0 | 660,0 | 660,0 | 660,0 |
| V , cm ³ | 490,0 | 495,0 | - | 490,0 | 485,0 | 490,0 | 490,0 | 485,0 | 480,0 |
| Gmb , g/cm ³ | 2,38 | 2,34 | - | 2,36 | 2,36 | 2,37 | 2,35 | 2,36 | 2,38 |
| Gmb médio, g/cm ³ | 2,36 | | 2,36 | | 2,36 | | | | |

Fonte: do Autor (2016)

Tabela 19 – Parâmetros volumétricos das misturas

| Teor de borracha, % | 1 | 1,5 | 2 |
|----------------------------|----------|-------------|----------|
| Teor de asfalto, % | | 6% | |
| Volume de vazios, Vv | 5,39 | 6 | 8 |
| Vazios com betume, VCB | 13,75 | 13,64 | 13,40 |
| Vaz. agregado min., VAM | 19,13 | 19,74 | 21,14 |
| Rel. betume/vazios, RBV | 72 | 69 | 63 |
| Teor de asfalto, % | | 6,5% | |
| Volume de vazios, Vv | 3,23 | 5,57 | 6,19 |
| Vazios com betume, VCB | 13,95 | 13,62 | 13,53 |
| Vaz. agregado min., VAM | 17,18 | 19,18 | 19,72 |
| Rel. betume/vazios, RBV | 81,20 | 70,99 | 68,59 |
| Teor de asfalto, % | | 7% | |
| Volume de vazios, Vv | 3,63 | 3,76 | 5,19 |
| Vazios com betume, VCB | 13,79 | 13,77 | 13,57 |
| Vaz. agregado min., VAM | 17,42 | 17,53 | 18,75 |
| Rel. betume/vazios, RBV | 79,18 | 78,58 | 72,35 |
| Teor de asfalto, % | | 7,5% | |
| Volume de vazios, Vv | 0,75 | 2,03 | 3,60 |
| Vazios com betume, VCB | 14,10 | 13,92 | 13,69 |
| Vaz. agregado min., VAM | 14,85 | 15,95 | 17,29 |
| Rel. betume/vazios, RBV | 94,95 | 87,24 | 79,19 |
| Teor de asfalto, % | | 8% | |
| Volume de vazios, Vv | 2,18 | 2,13 | 2,16 |
| Vazios com betume, VCB | 13,79 | 13,80 | 13,80 |
| Vaz. agregado min., VAM | 15,98 | 15,93 | 15,96 |
| Rel. betume/vazios, RBV | 86,34 | 86,63 | 86,44 |

Fonte: do Autor (2016)

Tabela 20 – Resultados da estabilidade e fluência Marshall

| Teor de borracha, % | | | 1 | 1,5 | 2,0 |
|-------------------------|------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| Teor de asfalto, % | | | 6,0 | | |
| Estabilidade | CP 1 | Observada | 800,0 | 681,0 | 232,0 |
| | | Corrigida | 832,0 | 701,4 | 236,6 |
| | CP 2 | Observada | 754,0 | 380,0 | 253,0 |
| | | Corrigida | 784,2 | 395,2 | 263,1 |
| | CP 3 | Observada | 615,0 | 468,0 | 278,0 |
| | | Corrigida | 627,3 | 491,4 | 283,6 |
| Estabilidade média, kgf | | | 748 | 529 | 261 |
| Fluência | CP 1 | | 0,00 | 0,03 | 0,00 |
| | CP 2 | | 0,48 | 0,00 | 0,32 |
| | CP 3 | | 0,00 | 0,16 | 0,00 |
| Fluência média, mm | | | 0,10 | 0,16 | 0,06 |
| Teor de asfalto, % | | | 6,5 | | |
| Estabilidade | CP 1 | Observada | 453,0 | 572,0 | 82,0 |
| | | Corrigida | 480,2 | 606,3 | 85,3 |
| | CP 2 | Observada | 638,0 | 617,0 | 194,0 |
| | | Corrigida | 689,0 | 654,0 | 205,6 |
| | CP 3 | Observada | 611,0 | 487,0 | 116,0 |
| | | Corrigida | 647,7 | 516,2 | 121,8 |
| Estabilidade média, kgf | | | 301,3 | 222,5 | 605,6 |
| Fluência | CP 1 | | 0,00 | 0,58 | 0,00 |
| | CP 2 | | 0,19 | 0,68 | 0,30 |
| | CP 3 | | 0,50 | 0,45 | 0,19 |
| Fluência média, mm | | | 0,10 | 0,59 | 0,25 |
| Teor de asfalto, % | | | 7,0 | | |
| Estabilidade | CP 1 | Observada | 636,0 | 457,0 | 82,0 |
| | | Corrigida | 661,4 | 479,9 | 85,3 |
| | CP 2 | Observada | 684,0 | 606,0 | 194,0 |
| | | Corrigida | 704,5 | 642,4 | 205,6 |
| | CP 3 | Observada | 656,0 | 521,0 | 116,0 |
| | | Corrigida | 669,1 | 547,1 | 121,8 |
| Estabilidade média, kgf | | | 301,3 | 222,5 | 678,4 |
| Fluência | CP 1 | | 0,00 | 0,16 | 0,72 |
| | CP 2 | | 0,19 | 0,19 | 0,60 |
| | CP 3 | | 0,00 | 0,20 | 0,24 |
| Fluência média, mm | | | 0,10 | 0,12 | 0,51 |
| Teor de asfalto, % | | | 7,5 | | |
| Estabilidade | CP 1 | Observada | 608,0 | 531,0 | 373,0 |
| | | Corrigida | 650,6 | 568,2 | 395,4 |
| | CP 2 | Observada | 613,0 | 348,0 | 322,0 |
| | | Corrigida | 637,5 | 368,9 | 338,1 |
| | CP 3 | Observada | 596,0 | 540,0 | 378,0 |
| | | Corrigida | 655,6 | 214,2 | 121,8 |
| Estabilidade média, kgf | | | 647,9 | 501,4 | 378,1 |
| Fluência | CP 1 | | 0,26 | 0,00 | 0,00 |
| | CP 2 | | 0,23 | 0,00 | 0,21 |
| | CP 3 | | 0,26 | 0,56 | 0,05 |
| Fluência média, mm | | | 0,25 | 0,19 | 0,09 |
| Teor de asfalto, % | | | 8,0 | | |
| Estabilidade | CP 1 | Observada | 309,0 | 300,0 | 82,0 |
| | | Corrigida | 321,4 | 315,0 | 85,3 |
| | CP 2 | Observada | 273,0 | 128,0 | 194,0 |
| | | Corrigida | 281,2 | 138,2 | 205,6 |
| | CP 3 | Observada | - | 204,0 | 116,0 |
| | | Corrigida | - | 214,2 | 121,8 |
| Estabilidade média, kgf | | | 301,3 | 222,5 | 137,6 |
| Fluência | CP 1 | | 0,00 | 0,46 | 0,00 |
| | CP 2 | | 0,19 | 0,25 | 0,32 |
| | CP 3 | | - | 0,00 | 0,00 |
| Fluência média, mm | | | 0,10 | 0,24 | 0,11 |

Fonte: do Autor (2016)

ANEXO A – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo – Classificação por penetração

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

Fonte: DNIT (2006)

ANEXO B – Valores limites para parâmetros *Marshall*

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

Fonte: DNIT (2004)

ANEXO C – Valores mínimos de vazios de agregado mineral

| VAM – Vazios do Agregado Mineral | | |
|---|------------|-------------------------|
| Tamanho Nominal Máximo do agregado | | VAM Mínimo % |
| # | m m | |
| 1½" | 38,1 | 13 |
| 1" | 25,4 | 14 |
| ¾" | 19,1 | 15 |
| ½" | 12,7 | 16 |
| ⅜" | 9,5 | 18 |

Fonte: DNIT (2004)

ANEXO D – Correção da estabilidade, em função da espessura do corpo de prova

| ESPESSURA (mm) | FATOR | ESPESSURA (cm) | FATOR | ESPESSURA (cm) | FATOR |
|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
| 50,8 | 1,47 | 56,3 | 1,22 | 64,3 | 0,98 |
| 51,0 | 1,45 | 56,6 | 1,21 | 64,7 | 0,97 |
| 51,2 | 1,44 | 56,8 | 1,20 | 65,1 | 0,96 |
| 51,6 | 1,43 | 57,12 | 1,19 | 65,6 | 0,95 |
| 51,8 | 1,42 | 57,4 | 1,18 | 66,1 | 0,94 |
| 52,0 | 1,41 | 57,7 | 1,17 | 66,7 | 0,93 |
| 52,2 | 1,40 | 58,1 | 1,16 | 67,1 | 0,92 |
| 52,4 | 1,39 | 58,4 | 1,15 | 67,5 | 0,91 |
| 52,6 | 1,38 | 58,7 | 1,14 | 67,9 | 0,90 |
| 52,9 | 1,37 | 59,0 | 1,13 | 68,3 | 0,89 |
| 53,1 | 1,36 | 59,3 | 1,12 | 68,8 | 0,88 |
| 53,3 | 1,35 | 59,7 | 1,11 | 69,3 | 0,87 |
| 53,5 | 1,34 | 60,0 | 1,10 | 69,9 | 0,86 |
| 53,8 | 1,33 | 60,3 | 1,09 | 70,3 | 0,85 |
| 54,0 | 1,32 | 60,6 | 1,08 | 70,8 | 0,84 |
| 54,2 | 1,31 | 60,9 | 1,07 | 71,4 | 0,83 |
| 54,5 | 1,30 | 61,1 | 1,06 | 72,2 | 0,82 |
| 54,7 | 1,29 | 61,4 | 1,05 | 73,0 | 0,81 |
| 54,9 | 1,28 | 61,9 | 1,04 | 73,5 | 0,80 |
| 55,1 | 1,27 | 62,3 | 1,03 | 74,0 | 0,79 |
| 55,4 | 1,26 | 62,7 | 1,02 | 74,6 | 0,78 |
| 55,6 | 1,25 | 63,1 | 1,01 | 75,4 | 0,77 |
| 55,8 | 1,24 | 63,5 | 1,00 | 76,2 | 0,76 |
| 56,1 | 1,23 | 63,9 | 0,99 | | |

Fonte: DNER (1995)