

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Filipe Pereira dos Reis

**AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURA ASFÁLTICA
RECICLADA A FRIO**

Avaliador:
Defesa: dia 10/12/2018 às 15:00 horas
Local: UFRGS / LAPAV Bento Gonçalves, 9500
Anotações com sugestões para qualificar o trabalho são bem-vindas. O aluno fará as correções e lhe passará a versão final do trabalho, se for de seu interesse.

Porto Alegre
dezembro 2018

FILIPPE PEREIRA DOS REIS

**AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURA ASFÁLTICA
RECICLADA A FRIO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Washington Peres Núñez

Porto Alegre
dezembro 2018

FILIPPE PEREIRA DOS REIS

**AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURA ASFÁLTICA
RECICLADA A FRIO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 01 de dezembro 2018

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Lysiane Menezes Pacheco (PUCRS)
Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (UFRGS)
PhD. pela University of Nottingham

Dedico este trabalho a minha família, em especial aos meus pais, e minha namorada Vanessa, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Washington, orientador deste trabalho, pelos ensinamentos, pelo tempo disponibilizado, pela compreensão nos momentos de dificuldade e pelo exemplo de profissional dedicado à transmissão do conhecimento.

Agradeço ao LAPAV, em especial ao programa PETER e a seus integrantes pelos ensinamentos, pelos congressos, pelos cafezinhos rodoviários, pela parceria e pelos churrascos e demais confraternizações.

Agradeço ao Prof. Lélío, por realizar uma palestra magnífica no ano de 2014 que me fez saber que a área da pavimentação era o meu objetivo de atuação e posteriormente, como tutor do PETER, pela cobrança de desempenho na graduação e participação em congressos, tendo sido fundamental na minha formação.

Agradeço aos colegas da Concepa, em especial aos engenheiros Luzzi, Eduardo, Fábio e Thiago pela transmissão do conhecimento prático da atividade de engenharia e pelo suporte dado durante o período em que trabalhamos juntos.

Agradeço ao engenheiro Vinícius, responsável pela MVPAV, pelo auxílio na execução dos ensaios realizados e pelas conversas e sugestões que agregaram muito a este trabalho.

Agradeço aos meus pais, Clarice e Roberto, e aos meus irmãos, Cristiano e Rafael, pelo apoio, pelas conversas e pela ajuda durante a execução deste trabalho, assim como, durante todo o período de graduação.

Agradeço aos amigos, Marcel, Maurício, Mathaus e Renato, que desde o ensino fundamental acompanham esta trajetória, tendo auxiliado brilhantemente nos possíveis momentos de distração.

Agradeço aos colegas e amigos da barra 2012/2, pelas madrugadas de estudos em grupo, pelos trabalhos realizados e pelas partidas de truco e sinuca disputadas pelo Campus do Vale.

Por fim, agradeço a minha companheira Vanessa, que me acompanha desde 2010, sempre me ajudando e me auxiliando durante todo esse período. Sem a sua ajuda este trabalho não seria entregue, e toda a trajetória da graduação estaria menos colorida. Te amo!

A única forma de ser feliz é amar.

Paulo Sant'Ana

RESUMO

Este trabalho aborda a reciclagem de pavimentos, no tocante da utilização de agregado reciclado, oriundo de procedimentos de conservação realizados na rodovia BR-290/RS, em misturas asfálticas do tipo pré-misturado à frio, com destino a sua utilização em camadas de revestimentos e/ou *binder* de pavimentos flexíveis em rodovias de baixo fluxo. A partir da revisão bibliográfica que versa sobre a pavimentação de modo geral e especificamente do pré-misturado à frio, dando ênfase nos procedimentos de reciclagem utilizados, foram adotados os critérios para a escolha das características desejadas para o projeto. Inicialmente, caracterizaram-se os materiais necessários para a realização do projeto, sendo o agregado basáltico, de mesma origem do agregado reciclado, a emulsão asfáltica de ruptura lenta e as amostras de fresado recolhidas, as quais tiveram maior ênfase de modo a verificar a homogeneidade deste material para diferentes dias e locais. Após, foi definida a granulometria da mistura e realizou-se o procedimento de dosagem Marshall, necessário para a determinação de um teor de projeto, seguindo o indicado nas normas e demais referências bibliográficas. Em seguida, foi definido o teor de projeto e através de um novo procedimento Marshall, determinadas as características de estabilidade, fluência, resistência à tração e módulo de resiliência. Contatou-se, a partir das características volumétricas, o volume de vazios de 18,47%, assim, indicando, em função da permeabilidade existente em misturas com mais de 12%, a sua aplicação em camadas de *binder*, mas com possibilidade de utilização em camadas de revestimento desde que com a utilização de capa selante. A estabilidade atendeu ao limite mínimo (0,25 kN) exigido em norma, mas atingiu, em média, apenas 27% dos resultados encontrados nos demais estudos pesquisados. Os resultados obtidos para a resistência à tração (0,34 MPa), determinada pelo ensaio de compressão diametral, e para o módulo de resiliência (1870 MPa) apresentaram resultados na mesma ordem de grandeza do que se tem encontrado nas misturas recicladas à frio. Desta forma, conclui-se que a mistura produzida está adequada a sua aplicação em camadas de *binder* e camadas de revestimento, desde que com o correto dimensionamento da estrutura através de métodos mecanísticos-empíricos. A realização de serviços de conservação, principalmente nas operações denominadas “tapa-buraco” é uma possibilidade de utilização do pré-misturado à frio.

Palavras-chave: Agregado Reciclado. Pré-misturado à frio.
Projeto de dosagem Marshall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de delineamento do trabalho.....	17
Figura 2 – Classificação das misturas asfálticas de acordo com sua temperatura de usinagem.....	20
Figura 3 – Processo de fresagem e recomposição asfáltica na rodovia BR-290/RS.....	32
Figura 4 – Ensaio de teor de ligante.....	33
Figura 5 – Curva granulométrica média do material fresado.....	34
Figura 6 – Ensaio de determinação da abrasão Los Angeles.....	35
Figura 7 – Ensaio de equivalente de areia.....	36
Figura 8 – Ensaio de adesividade.....	37
Figura 9 – Granulometria de projeto.....	40
Figura 10 – Prensa utilizada para estabilidade e fluência nos teores preliminares.....	45
Figura 11 – Prensa utilizada para estabilidade e fluência no teor de projeto.....	45
Figura 12 – Relação massa específica aparente com o percentual de emulsão.....	50
Figura 13 – Relação massa específica máxima com o percentual de emulsão.....	51
Figura 14 – Relação volume de vazios com o percentual de emulsão.....	51
Figura 15 – Relação VAM com o percentual de emulsão.....	52
Figura 16 – Relação RBV com o percentual de emulsão.....	52
Figura 17 – Relação estabilidade com o percentual de emulsão.....	53
Figura 18 – Relação fluência com o percentual de emulsão.....	53
Figura 19 – Relação das características volumétricas com o teor de projeto.....	56
Figura 20 – Relação estabilidade com o teor de projeto.....	58
Figura 21 – Relação fluência com o teor de projeto.....	58
Figura 22 – Resultado do ensaio de RT.....	59
Figura 23 – Comparativo de resultados de RT.....	59
Figura 24 – Resultado do ensaio de MR.....	60
Figura 25 – Comparativo de resultados de MR.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aplicações do PMF conforme o fluxo de veículos.....	23
Quadro 2 – Sugestões para o módulo de riqueza (k).....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos resultados obtidos nos estudos relacionados.....	30
Tabela 2 – Resultados de granulometria.....	33
Tabela 3 – Resultados de teor de ligante e granulometria por extração centrífuga.....	34
Tabela 4 – Resultados da caracterização dos agregados empregados.....	38

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ARE – Agente de reciclagem emulsionado

CA – Concreto asfáltico

CNT – Confederação Nacional de Transportes

CP – Corpo de prova

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

EAP – Emulsão asfáltico de petróleo

IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias

LAPAV – Laboratório de Pavimentação

LVDT – *Linear variable differential transformer*

PMF – Pré-misturado a frio

PMFA – Pré-misturado a frio de graduação aberta

PMFD – Pré-misturado a frio de graduação densa

PMFSD – Pré-misturado a frio de graduação semidensa

RL-1C – Emulsão asfáltica de ruptura lenta

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

USACE – *United States Army Corps of Engineers*

LISTA DE SÍMBOLOS

μ – coeficiente de Poisson (0,3)

a – coeficiente x^2 da função quadrática

A – Massa do corpo de prova seco ao ar (g)

b – coeficiente x^1 da função quadrática

B – Massa do corpo de prova imerso em água (g)

c – coeficiente x^0 da função quadrática

C – Massa do corpo de prova saturado com superfície seca (g)

D – diâmetro do corpo de prova (cm)

F – Massa do material passante na peneira N° 200 (g)

F_{MR} – carga repetida aplicada diametralmente ao corpo de prova (N)

F_{RT} – carga de ruptura (N)

H – altura do corpo de prova (cm)

H – altura do corpo de prova (cm)

k – Módulo de riqueza (3,2)

Me_a – Massa específica aparente (g/cm^3)

Me_m – Massa específica máxima do corpo de prova (g/cm^3)

MR – Módulo de resiliência (MPa)

N – Número de repetições do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf

p' – Teor de asfalto preliminar (%)

p – Teor de asfalto residual (%)

P_1 – Massa do material retido entre as peneiras N° 4 – N° 10 (g)

P_2 – Massa do material retido entre as peneiras 1/2” – N° 4 (g)

P_3 – Massa do material retido entre as peneiras 1” – 1/2” (g)

P_4 – Massa do material retido entre as peneiras 2” – 1” (g)

p'_{EA} – Teor de emulsão asfáltica preliminar (%)

R^2 – Coeficiente de determinação

RBV – Relação betume-vazios do corpo de prova (%)

RT – Resistência à tração (MPa)

S_1 – Massa do material retido entre as peneiras N° 80 – N° 200 (g)

S_2 – Massa do material retido entre as peneiras N° 40 – N° 80 (g)

S_3 – Massa do material retido entre as peneiras N° 10 – N° 40 (g)

t – Teor percentual em massa de asfalto na emulsão asfáltica (%)

VAM – Vazios do agregado mineral existente no corpo de prova (%)

V_v – Volume de vazios (%)

X_v – teor de projeto da mistura asfáltica (%)

Y_v – massa específica aparente máxima esperada para o teor de projeto (g/cm^3)

Δ – deformação elástica ou resiliente registrada no microcomputador, para aplicações da carga (F_{MR}) (cm)

Σ – Superfície específica de agregados (m^2/g)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	15
2.2.1 Objetivo Principal	15
2.2.2 Objetivos Secundários	15
2.3 PREMISSA	16
2.4 DELIMITAÇÕES	16
2.5 LIMITAÇÕES	16
2.6 DELINEAMENTO	16
3 PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA	19
4 MATERIAIS PRODUZIDOS A PARTIR DA EMULSÃO ASFÁLTICA	22
5 ESTUDOS RELACIONADOS	28
6.MATERIAIS E MÉTODOS	31
6.1 AGREGADOS	31
6.1.1 Agregado Fresado	31
6.1.1.1 Ensaio de granulometria	32
6.1.1.2 Ensaio de teor de ligante	33
6.1.1.3 Ensaio de determinação da abrasão <i>Los Angeles</i>	35
6.1.1.4 Ensaio de índice de forma	35
6.1.1.5 Ensaio de durabilidade	36
6.1.1.6 Ensaio de equivalente de areia	36
6.1.1.7 Ensaio de adesividade	37
6.1.2 Agregado basáltico	38
6.2 MATERIAIS ASFÁLTICOS	38
6.2.1 Emulsão asfáltica	38
6.2.1.1 Viscosidade Saybolt-Furol	39
6.2.1.2 Ensaio de peneiramento	39
6.2.1.5 Ensaio de resíduo por evaporação	39
6.3 PROJETO DE MISTURA ASFÁLTICA	39
6.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	47
6.5 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA	47
7 RESULTADOS	49

7.1 CARACTERÍSTICAS DOS TEORES PRELIMINARES.....	49
7.1.1 Teor de emulsão preliminar e de água de mistura.....	49
7.1.2 Características volumétricas.....	49
7.1.3 Características mecânicas.....	53
7.2 CARACTERÍSTICAS DOS TEOR DE PROJETO.....	54
7.2.1 Teor de projeto.....	54
7.2.2 Características volumétricas.....	54
7.2.3 Características mecânicas.....	56
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

É notória a importância dos transportes dentro da evolução da humanidade desde o período das grandes navegações que permitiram a colonização e maiores alcances comerciais. Estes processos continuam em evolução, passando por períodos como as revoluções industriais e chegando ao estágio em que se vive hoje, onde a rede de transportes demonstra ser cada vez mais essencial para o funcionamento da economia.

No Brasil a evolução do transporte foi calçada sobre o modal rodoviário, sendo a principal alternativa de circulação de cargas e passageiros, representada por 61% do transporte de cargas e de 95% da movimentação de pessoas, contribuindo de maneira significativa para o desenvolvimento nacional (CNT, 2017).

Em conflito a essa importância do modal rodoviário, as rodovias brasileiras pavimentadas no Brasil, de acordo com dados disponibilizados pela Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2017), representam apenas 12,3% do total de rodovias existentes no país, sendo que destas rodovias pavimentadas, 50% apresentam problemas no pavimento. Assim, a necessidade de melhoria, através de pavimentação de novas rodovias e da adequada manutenção das já existentes, do quadro atual dos pavimentos brasileiros, é requisito indispensável para a garantir a qualidade dos serviços de transportes. Os serviços de manutenção e de reabilitação das estruturas existentes elevam as condições de conforto e segurança aos usuários, além de proporcionar uma redução dos custos operacionais veiculares, progresso socioeconômico evidenciado pelo aumento da qualidade de vida, estruturação espacial e melhora da qualidade do transporte coletivo (ABEDA, 2010).

Um dos materiais comumente empregados em serviços de manutenção temporários ou emergenciais são as misturas asfálticas frias. Entretanto as mesmas apresentam dificuldade de entendimento técnico, visto que a maioria dos testes laboratoriais e avaliações realizadas foram inicialmente projetadas para misturas asfálticas quentes. Desta maneira, apesar de ser um material de simples produção e aplicação, existe um entendimento incompleto, principalmente a respeito da viscosidade das emulsões asfálticas, deste tipo de material (LIAO *et al.*, 2016).

Em contrapartida a inevitabilidade de investimentos e melhorias nas rodovias, o desenvolvimento da infraestrutura rodoviária é acompanhado por um impacto significativo ao meio ambiente, oriundo da extração de agregados pelo processo de desmonte de rochas, um recurso natural não renovável. Esta situação gerou um grave problema ecológico, exigindo técnicas alternativas para a realização de pavimentos sustentáveis, como o uso de tecnologia de pavimento asfáltico reciclado, dentre tantas outras já estudadas no meio acadêmico (ARIMILLI; JAIN; NAGABHUSHANA, 2016).

Os materiais retirados de rodovias durante seus processos de manutenções não detêm a atenção necessária para a realização do seu reaproveitamento. Os agregados reciclados possuem comportamento comparáveis ao dos agregados virgens podendo compor novas misturas para realização de serviços de pavimentação ou conservações. Aliado às qualidades que os materiais reciclados podem apresentar, se empregado da maneira correta, a sua utilização auxilia no solucionamento de um passivo ambiental das empresas da área, além de diminuir os custos com o consumo e transporte de agregados virgens. (TANSKI, 2016).

Sendo assim, esta pesquisa se propõe a contribuir para o aumento no emprego de pavimentos asfálticos reciclados, utilizando-se para isso de um viés da realidade atual do cenário socioeconômico e dos pavimentos brasileiros. Para isto, tratar-se-á sobre a utilização do agregado reciclado em misturas asfálticas habitualmente utilizadas por instituições que não disponibilizam de grandes recursos financeiros para investir na infraestrutura rodoviária.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Este capítulo propõe estabelecer as diretrizes para o desenvolvimento do presente trabalho. Nele estão descritas a questão de pesquisa, os objetivos do trabalho, a premissa, a delimitação, as limitações, assim como o delineamento.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

O trabalho procurou responder a seguinte questão de pesquisa: quais as características de uma mistura asfáltica fria seriam obtidas com a utilização de material reciclado oriundo da rodovia BR-290/RS?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão discriminados em principal e secundários delineados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal da pesquisa é verificar a possibilidade de utilização de uma mistura asfáltica fria com agregado reciclado, como camada de revestimentos e/ou *binder* de pavimentos flexíveis em rodovias de baixo fluxo.

2.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários são:

- a) a descrição e composição granulométrica dos agregados utilizados;
- b) a descrição da emulsão utilizada;
- c) a definição do teor de projeto de emulsão;
- d) a avaliação dos parâmetros mecânicos da mistura.

2.3 PREMISSA

A premissa do trabalho é viabilizar o emprego de agregados reciclados, algo já bastante estudado no meio acadêmico, mas com pouca utilização por parte de empresas ligadas ao ramo da pavimentação.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho está delimitado à análise laboratorial de mistura asfáltica fria, produzida com agregado reciclado originário da rodovia BR-290/RS, agregado basáltico, e emulsão asfáltica de ruptura lenta (RL-1C), com granulometria enquadrada dentro do especificado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) na faixa D da norma DNIT 153/2010 – ES.

2.5 LIMITAÇÕES

As limitações do trabalho estão apresentadas a seguir:

- a) o agregado reciclado foi retirado da rodovia com uma fresadora de asfalto acoplada a uma mini carregadeira;
- b) os agregados utilizados são de origem basáltica;
- c) o material asfáltico utilizado foi a emulsão asfáltica de ruptura lenta (RL-1C);
- d) a compactação dos corpos de prova foi realizada seguindo a metodologia Marshall;
- e) a determinação da resistência à tração foi obtida com o ensaio de resistência à tração na compressão diametral;
- f) o módulo de resiliência foi encontrado com equipamento de compressão diametral de carga repetida.

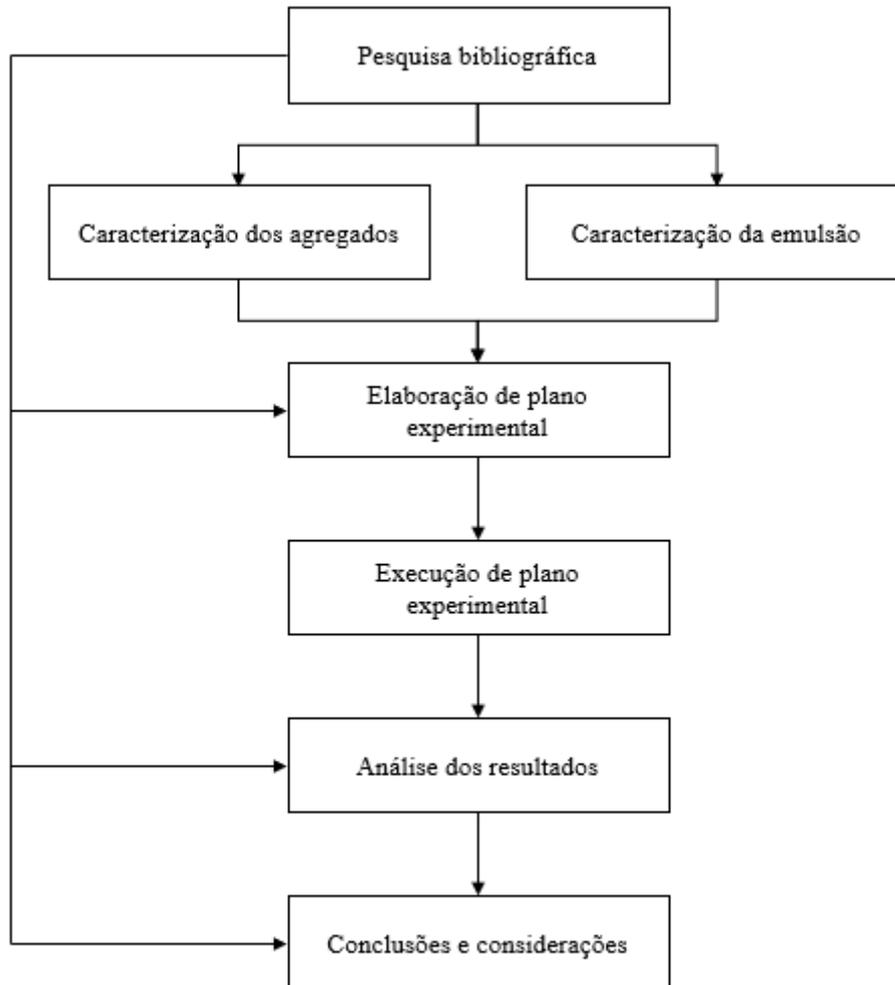
2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas elencadas a seguir e representadas na Figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) caracterização dos materiais;
- c) elaboração de plano experimental;
- d) execução de plano experimental;

- e) análise dos resultados;
- f) conclusões e considerações.

Figura 1 – Diagrama de delineamento do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

A pesquisa bibliográfica foi realizada de maneira a aprofundar os conhecimentos, a fim de criar um bom embasamento teórico sobre o assunto do trabalho. Durante esta etapa, foram consultadas teses, dissertações, artigos científicos, normas e livros que tratavam sobre a área da pavimentação asfáltica dando um enfoque sobre misturas asfálticas recicladas à frio.

Por conseguinte, deu-se início ao processo de caracterização dos materiais utilizados, isto é, do agregado fresado, do agregado natural e da emulsão asfáltica. Estes procedimentos ocorreram na empresa MVPAV e no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), levando em consideração o tempo a ser despendido para a realização dos mesmos.

Na elaboração do programa experimental, foram definidas as quantidades de corpos de prova (CP) necessários para a obtenção do teor de emulsão de projeto. Também, realizou-se a programação do ensaio de resistência à tração na compressão diametral, seguindo a norma DNIT 136/2010 - ME, assim como para o ensaio de módulo de resiliência na compressão diametral com carga repetida, de acordo com a norma DNIT 135/2010 - ME.

Durante a execução do programa experimental, foram realizados os ensaios definidos na etapa anterior. Com posse dos resultados dos ensaios, deu-se início a análise dos resultados observando se as propriedades da mistura eram satisfatórias. Por fim, a análise dos resultados levou às conclusões e considerações a respeito do trabalho.

3 PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

Idealizada na China, aperfeiçoada pelos romanos, o que chama-se hoje de estradas estão intimamente ligadas ao desenvolvimento da humanidade. Durante o período romano já era conhecido que as estradas sofriam com a degradação ao longo do tempo e conseqüentemente a importância da realização de sua manutenção (BALBO, 2007).

No final do século XIX, nos Estados Unidos foi realizado o primeiro pavimento com revestimento betuminoso, com a utilização de material asfáltico de origem natural. Já no meio do século XX os avanços científicos proporcionaram grande impulso na área da pavimentação. Durante este período, o *United States Army Corps of Engineers* (USACE) desenvolveu sua metodologia de dimensionamento de pavimentos, posteriormente difundida e normalizada por agências de fora dos Estados Unidos (BALBO, 2007).

No Brasil, o engenheiro Murilo Lopes de Souza, no início da década de 60, fundamentou-se no método da USACE, com a utilização do ensaio de Índice de Suporte Califórnia, para elaborar o método empírico para o dimensionamento de pavimentos e adotado pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) no ano de 1981. O método do DNER considera o conceito, estabelecido em pista experimental da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), de equivalência estrutural para diferentes tipos de revestimentos (MEDINA, 2005). Ainda, Medina (2005, p.365) disserta sobre o método empírico de dimensionamento de pavimentos:

O estágio atual do conhecimento da mecânica dos pavimentos por parte de centros de pesquisas universitários, órgãos públicos, empresas de consultoria, empresas concessionárias, permite afirmar que já existe massa crítica suficiente para que se promova a apresentação de um método de referência que venha a substituir o “Método do DNER”.

Balbo (2007) trata sobre métodos de dimensionamento mecanísticos-empíricos, o qual considera como o esquema mais promissor na elaboração de projetos em virtude da avaliação do comportamento estrutural das camadas componentes dos pavimentos através das características mecânicas dos materiais. O Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do DNIT em parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), através do Projeto DNIT

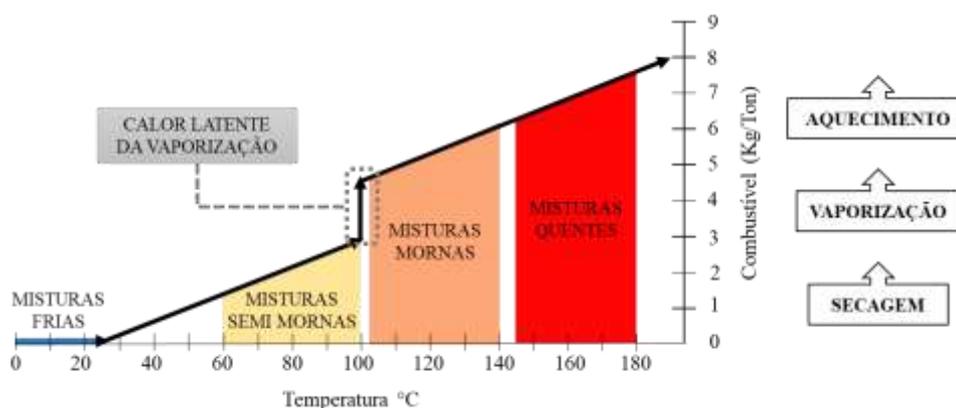
TED n°682/2014, realizam estudos para desenvolver um método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos brasileiros (DNIT, 2015).

Os pavimentos asfálticos são, normalmente, constituídos de quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico é a camada destinada a transmitir de forma atenuada os esforços de carga dos veículos às camadas inferiores do pavimento, garantindo a impermeabilidade, a flexibilidade, a estabilidade, a durabilidade, a resistência à fadiga e ao trincamento térmico e a resistência à derrapagem, proporcionando conforto e segurança ao tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os revestimentos asfálticos são formados pela união de materiais asfálticos com agregados, esta associação pode ser realizada principalmente por penetração ou por mistura. Revestimentos por penetração são formados pela aplicação de material asfáltico e pela distribuição e compressão de agregados. Revestimentos por mistura acontece quando o agregado é envolvido pelo material asfáltico antes da compressão podendo ser realizado em usina ou *in situ* (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Um dos modelos de classificação das misturas asfálticas é de acordo com a temperatura de usinagem da mistura, sendo classificadas em misturas quentes, misturas mornas, misturas semimornas e misturas frias. A Figura 2 apresenta esta classificação, assim como uma indicação de consumo de combustível necessário para realização da mistura. Destaca-se que os processos de secagem e de vaporização da água demandam grande parte do consumo energético das misturas quentes (MOTTA, 2011).

Figura 2 – Classificação das misturas asfálticas de acordo com sua temperatura de usinagem



(fonte: adaptado de D'Angelo et al., 2008)

As misturas asfálticas quentes são empregadas como revestimentos de pavimentos tanto para volumes de tráfego muito baixos quanto para volumes extremamente elevados. Devido a esta grande variabilidade de utilização, o concreto asfáltico (CA) é um dos tipos mais empregados no Brasil. As misturas a quente podem ser subdivididas de acordo com a granulometria dos agregados e fíler que a compõe, podendo ser consideradas de graduação densa, graduação aberta e graduação descontínua (BERNUCCI *et al.*, 2008).

As misturas mornas representam um grupo de tecnologias que permitem uma redução da temperatura na qual as misturas asfálticas são produzidas. Os principais benefícios obtidos pelo uso desta tecnologia são: os aspectos ambientais, devido à redução da queima de combustíveis e conseqüentemente menor emissão de gases poluentes; as melhorias a respeito da compactação, possibilitando transportes mais longos e o bem-estar dos trabalhadores. (D'ANGELO *et al.*, 2008)

As misturas asfálticas usinadas a frio, também denominadas de pré-misturado a frio (PMF), são constituídas de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, misturados em temperatura ambiente com emulsão asfáltica de petróleo (EAP) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

As emulsões asfálticas catiônicas proporcionaram vantagens na evolução das técnicas dos serviços de conservação como: trabalhabilidade apropriada em temperatura ambiente, facilidade de transporte e estocagem do material, alto envolvimento e adesividade entre ligante e agregado, assim como a disponibilidade de utilização do material em regiões de difícil aplicação de misturas aquecidas (ABEDA, 2010).

O PMF é normalmente utilizado como revestimento, ou camada intermediária, de estradas com baixo volume de tráfego e em operações de conservação e manutenção de revestimentos deteriorados. Este tipo mistura pode ser classificado em misturas densas e abertas, de acordo com a graduação dos seus agregados e do volume de vazios da mistura (BERNUCCI *et al.*, 2008). Visto que, esta é a mistura objeto de trabalho desta pesquisa, será realizada uma descrição mais detalhada deste material no capítulo subjacente.

4 MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO

As EAPs, comumente utilizadas como aglutinante das misturas frias, são definidas como uma mistura heterogênea de dois ou mais líquidos, os quais não se dissolvem entre si em condições normais, mas quando mantidos em suspensão por agitação ou pela adição de emulsificantes, formam uma mistura estável. Devido a diversidade de emulsões existentes, é possível a aplicação deste material em praticamente todas as camadas asfálticas de um pavimento flexível, podendo ser aplicado tanto na construção de novos pavimentos quanto na recuperação de pavimentos envelhecidos (ABEDA, 2010).

Uma das principais atividades com emulsões asfálticas, é na utilização em serviços de manutenções de pavimentos. Um dos procedimentos mais simples é a realização dos serviços denominados “tapa buracos” com a utilização de emulsão asfáltica. Destaca-se o pré-misturado a frio como um dos materiais mais empregados para esta operação, utilizado em virtude da facilidade de produção da mistura, assim como de execução dos serviços. A deterioração dos pavimentos é causada pela ação do tráfego e do clima sobre o pavimento, ocasionando o surgimento de defeitos superficiais como fissuras e trincas, os quais podem ser tratados pelo processo de selagem de trincas com o espalhamento de emulsão asfáltica sobre as mesmas e/ou aplicação de algum tratamento superficial. No caso de evolução destes defeitos, inicia-se as atividades de “tapa buraco” para a correção do pavimento, onde, caso ocorra o retardamento das manutenções corretivas, ocasionará em serviços de maior complexibilidade e mais onerosos (ABEDA, 2010).

De acordo com ABEDA (2010, p.105) dentre as possibilidades de serviços realizados com emulsão asfáltica, o PMF talvez seja o mais utilizado. Muito se deve a simplicidade de produção e aplicação deste tipo de mistura, podendo ser misturado em betoneiras e aplicado até com motoniveladora. Estas facilidades, aliado ao baixo custo, quando comparados ao concreto asfáltico convencional, faz com que cidades que não possuem recursos financeiros escolham por essa técnica para serviços de pavimentação. Ainda, segundo a associação “o PMF consiste numa mistura, de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (fíler) e emulsão asfáltica catiônica convencional ou modificada por polímeros (ruptura média ou lenta) espalhada e compactada a frio”.

Os teores de projeto de emulsão asfáltica para o PMF são, assim como para concretos asfálticos, definidos pelo método Marshall, conforme a norma DNIT 153/2010 – ES. Embora seja utilizado para sua dosagem na prática comum, ressalve-se o fato de que não existe um critério consagrado para a definição do teor de ligante e do índice de vazios em laboratório. Desta forma, havendo a necessidade de aplicação de critérios empíricos, os quais não estão estabelecidos e encontrados desorganizadamente na literatura (BALBO, 2007).

Conforme Santana (1993), as características funcionais, estruturais e hidráulicas do PMF variam em função do volume de vazios (V_v), e da granulometria adotada. Podendo ser executados em três categorias:

- a) Aberto (PMFA): com pequena quantidade ou sem agregado miúdo e com pouco ou nenhum fíler, este tipo de graduação apresenta volume de vazios elevado, após a compactação, $22 < V_v \leq 34\%$;
- b) Semidenso (PMFSD): quantidade intermediária de agregado miúdo e pouco fíler, apresentando após a compactação um volume de vazios intermediário, $15 < V_v \leq 22\%$;
- c) Denso (PMFD): com quantidades significativas de agregados graúdo, miúdo e de enchimento, apresentando volume de vazios relativamente baixos após a compactação, $9 < V_v \leq 15\%$;

Ainda, o autor sugere a utilização do PMF conforme o tráfego de veículos, determinado em função do número N , que representa o número de repetições do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf durante a vida útil do pavimento, de acordo com o apresentado na Quadro 1, onde, encontra-se um resumo das aplicações propostas para os diferentes tipos de PMF em função tráfego.

Quadro 1 – Aplicações do PMF conforme o fluxo de veículos

TIPO DE PMF	TRÁFEGO DE VEÍCULOS	APLICAÇÕES
PMFA e PMFSD	$N \leq 2.10^6$	Revestimento com capa selante
	$N \leq 10^7$	<i>Binder</i> e bases
PMFD	$N \leq 10^7$	Revestimento sem capa selante

(fonte: adaptado de Santana, 1993)

Em contraponto ao indicado no Quadro 1, cabe salientar que o manual de pavimentação (DNIT, 2006) especifica para fluxos de veículos com $N \leq 5.10^6$ os revestimentos devem ser realizados exclusivamente com concreto asfáltico.

Um aspecto importante em misturas abertas, é o fato da recorrência do problema da reduzida coesão entre o ligante asfáltico e o esqueleto mineral da mistura. Além disso, o alto índice de vazios deste tipo de mistura, que acaba por elevar sua permeabilidade, contribui para a oxidação e lavagem do ligante aplicado no decorrer do tempo (BALBO, 2007). A respeito da permeabilidade, Bernucci et al. (2008) destacam que para volumes de vazios maiores do que 12% o material apresenta alta permeabilidade, havendo a necessidade de aplicação de uma camada selante.

Em misturas densas, após a completa ruptura da emulsão, o resultado final seria capaz de se assemelhar ao concreto asfáltico. Entretanto, para isto, é necessário que o índice de vazios seja relativamente pequeno, evitando a densificação e a ocorrência de deformações permanentes da camada de rolamento pela ação do tráfego. Este material vem conquistando maiores aplicações no campo da reciclagem de pavimentos asfálticos fresados (BALBO, 2007).

Sobre o processo de reciclagem, de acordo com Ceratti, Bernucci e Soares (2015), pode ocorrer quando há necessidade de restauração de um pavimento asfáltico degradado em função da ação do tráfego e das intempéries. No caso do material existente ser retirado pelo processo denominado de fresagem, ele pode ser empregado novamente constituindo-se assim o que é denominado de reciclagem. Para Ceratti, Bernucci e Soares, (2015, p.33), reciclagem de pavimento é:

[...] o processo de reutilização de misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas para produção de novas misturas asfálticas, aproveitando os agregados e o ligante asfáltico remanescente, provenientes da fresagem, com acréscimo de novos insumos: agregados, CAP ou EAP novos, asfalto espuma, e/ou aglomerantes hidráulicos.

De acordo com Bonfim (2016) a fresagem utilizada para a restauração de pavimentos pode ser dividida em dois processos específicos, um método a frio que realiza o desbaste da estrutura por abrasão e um processo a quente, no qual o revestimento é pré-aquecido para facilitar a sua extração. Outrossim, a principal diferença apontada entre os processos é na curva granulométrica residual, onde na fresagem a frio ocorre a alteração da curva devido a formação de grumos, enquanto que na fresagem a quente se consegue aproximar, sem alterações significativas, das características granulométricas iniciais do agregado.

Assim como os serviços de fresagem, os procedimentos de reciclagem de pavimentos podem ser subdivididos de acordo com a temperatura aplicada (quente ou frio) e localização da produção da mistura (em usina ou *in loco*). Kandhal e Mallick (1997) definiram os

procedimentos de reciclagem de pavimentos em quatro métodos diferentes: reciclagem a quente em usina, reciclagem a quente *in loco*, reciclagem fria *in loco* e recuperação de profundidade total.

A reciclagem realizada a quente em usina é, de acordo com Kandhal e Mallick (1997), o processo em que os materiais recuperados são combinados a novos materiais em usinas com o intuito de produzir uma mistura asfáltica quente equivalente ao concreto asfáltico. Ainda, os equipamentos utilizados para produção e aplicação desta mistura são os mesmos utilizados para concretos asfálticos convencionais. Sendo usado, normalmente, porcentagens entre 10% e 30% de material reciclados neste tipo de mistura. Entre as vantagens da realização deste processo, incluem-se a capacidade de corrigir a maioria dos defeitos, deformações e fissuras da superfície com a mesma eficiência das misturas convencionais.

O método que constitui a reciclagem a quente *in loco* é o processo onde o pavimento existente é previamente aquecido e posteriormente fresado até a profundidade determinada no projeto de restauração. O pavimento reciclado por este método pode ser executado em operação única, onde o pavimento é fresado e os novos agregados e o agente de reciclagem são adicionados durante o processo de fresagem, ou em operação de passagem múltipla, na qual o pavimento é retirado e aplicado posteriormente já com as modificações necessárias. A profundidade de trabalho desta atividade, varia entre 20 a 50 mm. De mesmo modo, as vantagens da reciclagem no local são que as rachaduras superficiais podem ser eliminadas, os problemas de irregularidades podem ser amenizados ou até corrigidos, o asfalto envelhecido é rejuvenescido, a granulometria da mistura e o teor de ligante asfáltico podem ser modificados, a interrupção do trânsito é mínima e os custos de transporte são minimizados (KANDHAL; MALLICK, 1997).

A reciclagem a frio *in loco* reutiliza o pavimento existente sem aquecimento durante o processo de produção e de aplicação da nova mistura. Este método não necessita de utilização de qualquer tipo de agente de reciclagem enquanto que o emprego de novos agregados nem sempre se faz necessário o que acaba ocasionando em custos muito baixos com transportes. Normalmente, é empregada a emulsão asfáltica como um agente de reciclagem ou aglutinante sendo aplicada proporcionalmente a porcentagem em peso do material reciclado. Também podem ser adicionados cinzas volantes, cimento ou cal viva, os quais são eficazes, de modo geral, para misturas que apresentam baixos valores de estabilidade. O processo normalmente é

realizado por equipamento específico para esta atividade que é composta da fresagem do pavimento, adequação da mistura, aplicação e compactação. A profundidade do tratamento é tipicamente de 75 a 100 mm. As vantagens da reciclagem a frio executada *in loco* compreendem medidas corretivas estruturais significativas para a maioria dos defeitos encontrados nos pavimentos, a melhoria da qualidade do pavimento, a minimização dos serviços de transporte e benefícios ambientais, visto que não ocorre queima de combustíveis para aquecimento da mistura (KANDHAL; MALLICK, 1997).

Outra modalidade de reciclagem a frio é o que Kandhal e Mallick (1997) classificam como recuperação profunda, onde os autores a definem como um método de reciclagem em que toda a seção de pavimento de asfalto e uma quantidade predeterminada de material da base subjacente são tratadas para produzir uma nova base estabilizada. É basicamente um processo de reciclagem de mistura a frio em que são adicionados diferentes tipos de aditivos, tais como emulsões asfálticas e agentes químicos, como cloreto de cálcio, cimento Portland, cinzas volantes e cales, para obter uma base com características superiores às existentes. As quatro etapas principais neste processo são a fresagem, a introdução de aditivos, a compactação e a aplicação de um tratamento superficial ou um revestimento asfáltico novo. Novos agregados também podem ser adicionados ao material no local para obter uma granulometria diferente da existente ou no caso da quantidade de material no local não seja suficiente para fornecer a espessura desejada da base tratada. Sendo normalmente realizado a uma profundidade de 100 mm a 300 mm. Este método de reciclagem soluciona a maioria dos defeitos do pavimento, podendo-se realizar melhorias estruturais significativas (especialmente na base), os problemas de descarte e destinação do material são eliminados e custo de transporte é minimizado.

Uma vez que tenha sido decidida a utilização da reciclagem e a seleção do modo a ser realizada, devem ser considerados os itens elencados a seguir, conforme indicado no manual de restauração de pavimentos (DNIT, 2006):

- a) condições do pavimento;
- b) capacidade estrutural;
- c) qualidade do material;
- d) disponibilidade de material virgem;
- e) características da rodovia;
- f) tráfego e sua possibilidade de remanejamento;
- g) disponibilidade de equipamentos;

- h) características do subleito e demais materiais constituintes do pavimento;
- i) objetivo da restauração.

Na reciclagem de revestimento degradados, de modo geral, Bernucci *et al.* (2008) destacam que normalmente os agregados conservam suas características físicas e mecânicas, ao passo que o ligante apresenta modificações nas características, tornando-se mais viscoso após o envelhecimento. Ainda, os autores afirmam que é possível recuperar as características iniciais do ligante com a adição de agentes rejuvenescedores.

A reciclagem de misturas a frio tem sido usada para corrigir problemas no pavimento tanto na camada de revestimento quanto na camada de base, embora o método tenha maior utilização na camada inferior. Um dos métodos mais populares é a estabilização de misturas recicladas a frio com emulsão asfáltica, entretanto podem ser aplicados materiais do tipo asfalto-espuma e aditivos como: cinzas volantes, cimento Portland e cales. Embora o desempenho alcançado com misturas recicladas em usina a frio tenha sido aceitável em camadas de revestimento, normalmente é necessário que um tratamento superficial ou um recapeamento com concreto asfáltico seja colocado como camada de rolamento visando proteger a mistura reciclada de danos causados pela umidade e pelo trânsito (KANDHAL; MALLICK, 1997).

Em razão de que não se tenha encontrado, de maneira organizado dentro da literatura pesquisada, manuais consagrados a respeito da reciclagem de pavimentos asfálticos para realização de misturas asfálticas frias aplicadas em camadas de revestimento, o próximo capítulo irá tratar sobre pesquisas que, de alguma maneira, se relacionem ao estudo proposto, visando a comparação de resultados e desempenho das misturas projetadas.

5 ESTUDOS RELACIONADOS

Embora a utilização de misturas asfálticas recicladas a frio para realização de camadas de revestimento ainda seja pouco disseminada, tendo em vista as suas características esperadas de baixos valores para resistência à tração e módulo de resiliência, a sua utilização se faz pertinente para vias com menor fluxo de veículos. Tal fato motiva variados estudos sobre a resistência de tal mistura. Este capítulo será destinado a realizar uma compilação das principais pesquisas, encontradas que abordam o tema da adição de agregado reciclado em misturas frias, assim como pesquisas que obtiveram resultados de boa qualidade, mesmo que sem a adição de agregado fresado, a fim de realizar a comparação aos resultados obtidos nesta pesquisa.

A pesquisa de David (2006) trata da inter-relação entre misturas frias e a reciclagem de pavimentos, baseando-se nas misturas asfálticas produzidas com fresado advindo de revestimentos asfálticos envelhecidos, com e sem adição de agregado virgem, adicionados de dois tipos de ligantes: emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta e agente de reciclagem emulsionado (ARE). Produzindo, assim, quatro tipos de misturas as quais foram avaliadas através do método Marshall. Como resultados, o autor destacou que as misturas analisadas apresentaram comportamento mecânico de resiliência e resistência à tração semelhante aos obtidos na literatura para outras misturas frias com agregado reciclado. Foi evidenciado que misturas com emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta demonstraram desempenho melhor do que as misturas com agente de reciclagem emulsionado. As misturas selecionadas para comparação, e apresentadas na Tabela 1, foram as produzidas a partir da emulsão asfáltica de ruptura lenta em misturas somente com a utilização de agregado reciclado, identificada como mistura 1 e com a adição de virgem, identificada como mistura 2.

Em Ameri e Behnood (2011) foram avaliadas as propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica reciclada a frio, a fim de verificar a eficácia da escória de aço como substituto dos agregados, baseando-se na realidade do pavimento do Irã. Nesse sentido, foram realizadas misturas asfálticas tendo como base os requisitos de classificação do *Asphalt Institute* para misturas frias. As misturas asfálticas foram realizadas com dois tipos de agregados fresados em rodovias de regiões diferentes, duas emulsões asfálticas, uma aniônica e outra catiônica e com 10% e 20% da composição granulométrica de escória de aço ou de agregado virgem. Sendo

assim, foram realizados 8 tipos de misturas diferentes e a partir disso, foi possível evidenciar que o uso de escórias de aço pode melhorar a estabilidade Marshall, assim como o módulo de resiliência, a resistência à tração, a resistência ao dano de umidade e a resistência à deformação permanente de misturas frias. De acordo com os resultados obtidos para esta pesquisa, os autores evidenciaram melhores resultados com emulsões aniônicas, devido a utilização de escória de aço, na preparação de misturas quando comparados as emulsões catiônicas. Deste estudo, foram selecionadas as duas misturas produzidas a partir de emulsão catiônica, agregado virgem e agregado reciclado, apresentando-as na Tabela 1.

Ferrotti, Pasquini e Canestrari (2014) trataram da manutenção de pavimentos rodoviários com a caracterização experimental de uma mistura fria de alta performance reforçada com três tipos de fibras: celulose, vidro-celulose e nylon-poliéster-celulose. A mistura foi dosada com duas quantidades diferentes de fibra, sendo de 0,15% e 0,30%, pelo peso de agregado. Após diferentes tempos de cura (1, 7, 14, 28 dias) e condições (seco e úmido), os resultados dos testes laboratoriais (Estabilidade Marshall, Resistência à Tração Indireta, Abrasão e Compactabilidade) mostraram que a mistura com 0,15% de fibras de celulose possui desempenho semelhante ou mesmo maior desempenho do que a mistura sem fibras, podendo ser mais utilizados com sucesso em atividades de manutenção. A tabela 1 apresenta os resultados produzidos sem a adição de fibras, a qual foi escolhida devido a maior semelhança dos materiais utilizados na pesquisa de Ferrotti, Pasquini e Canestrari (2014), com esta presente pesquisa.

Outro estudo que aborda a inter-relação entre PMFs com agregado reciclado é a pesquisa de Cerentini (2016) o qual disserta sobre a viabilidade da utilização de material fresado advindo de revestimentos asfálticos para o cenário brasileiro, mais especificamente na região central do estado do Rio Grande do Sul. Por meio da análise laboratorial, o estudo elaborou um projeto para uma mistura asfáltica fria com agregado reciclado visando a utilização deste material em camadas de revestimento de rodovias com baixo volume de tráfego. A partir das características mecânicas de resistência à tração e de módulo de resiliência, apresentadas na Tabela 1 juntamente com demais características da mistura, o autor concluiu positivamente para a utilização deste tipo de material em camadas de revestimento e em operações “tapa buraco” de vias com tráfego leve.

No cenário Indiano, como evidenciado no estudo de Arimilli, Jain e Nagabhushana (2016), após alguns testes de laboratório - dano por umidade induzida, módulo de resiliência, deformação permanente, e vida de fadiga - para a avaliação do desempenho das misturas frias sem adição de agregado reciclado e com a adição de 30%, 50%, 60%, 70% e 80% de material reciclado. Os resultados, apresentados na Tabela 1, obtidos indicaram que as misturas com 60% de agregado fresado mostraram o melhor desempenho, dentre as misturas estudadas indicando, que é possível projetar misturas betuminosas de alta qualidade incorporando uma quantidade considerável de agregado reciclado que atenda critérios desejados de desempenho.

Por fim, a Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados encontrados nos estudos relacionados, os quais servirão para comparação e análise dos resultados obtidos.

Tabela 1 – Resumo dos resultados obtidos nos estudos relacionados

Referência	David (2006) ¹	David (2006) ²	Ameri e Behnood (2011) ¹	Ameri e Behnood (2011) ²	Ferrotti, Pasquini e Canestrari (2014)	Cerentini (2016)	Arimilli, Jain e Nagabhushana (2016)
Teor de Fresado (%)	100	-	80	90	0	80	60
Teor de Emulsão (%)	-	-	-	-	-	7,00	-
Teor de Asfalto (%)	3,00	3,00	3,40	3,30	5,00	-	3,8 *
Mea (g/cm ³)	1,86	1,93	2,05	1,95	-	2,17	-
Vv (%)	24,00	22,00	13,00	12,30	19,60	7,39	-
Estabilidade (kgf)	724 *	765 *	1373 *	1232 *	714 *	-	-
Fluência (mm)	2,51 *	2,50 *	2,83	2,53	-	-	-
RT (MPa)	0,38 *	0,35 *	0,41 *	0,41 *	0,25	0,25	0,47 *
MR (MPa)	3707	5415	2200 *	2100 *	-	967	1700 *

Nota: Massa específica aparente (Mea), Volume de vazios (Vv), Resistência à tração (RT) e Módulo de resiliência (MR)

* aproximado visualmente através de gráfico

- valores não informados nos estudos

(fonte: o próprio autor)

Destaca-se que, em alguns dos estudos, em função da produção de mais de um tipo de mistura asfálticas, foram selecionadas as que apresentavam maior quantidade de características semelhantes com o que se propões nesta presente pesquisa.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo destina-se a apresentação da caracterização dos materiais e dos métodos utilizados nesta presente pesquisa. Os materiais empregados na composição da mistura do PMF são compreendidos por: agregado fresado, agregado natural e emulsão asfáltica. Os ensaios realizados estão descritos de maneira sucinta, de acordo com as normas indicadas. Ainda, neste capítulo constam informações a respeito da coleta de materiais e definições de procedimentos sem especificação normativa utilizados.

6.1 AGREGADOS

Os agregados utilizados nesta pesquisa podem ser subdivididos em agregado basáltico fresado e agregado basáltico virgem que será adicionado à mistura para adequação da granulometria à faixa D, conforme especificado pela norma DNIT 153/2010 – ES.

6.1.1 Agregado fresado

O material utilizado tem origem de processos de manutenção e conservação rodoviárias no trecho da rodovia BR-290/RS. As coletas dos materiais foram realizadas durante dias e locais variados, durante os meses de setembro e outubro de 2017, na rodovia após a realização do processo de fresagem e recomposição asfáltica, de acordo com a Figura 3, executados pelas equipes da empresa Triunfo Concepa.

Figura 3 – Processo de fresagem e recomposição asfáltica na rodovia BR-290/RS



(fonte: o próprio autor)

De posse dos materiais, iniciou-se o processo de caracterização dos mesmos através dos ensaios usualmente utilizados em agregados virgens. O ensaio de granulometria do agregado foi realizado antes e após a extração do ligante asfáltico existente na mistura, neste processo também foi determinado o teor de ligante existente na mistura. Também, no dia 19 de setembro, foram recolhidas quantidades extras de agregado para a realização dos ensaios de determinação da abrasão “Los Angeles”, índice de forma, durabilidade e equivalente de areia. As amostras, utilizadas para a caracterização do agregado fresado, serão identificadas a seguir como 62, 67 e 68 em função dos quilômetros onde foram recolhidas.

6.1.1.1 Ensaio de granulometria

Os ensaios de granulometria por peneiramento foram realizados de acordo com os procedimentos indicados pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) através da norma DNER-ME 083/98.

Após a extração de ligante, foram refeitas as granulometrias em todas as vinte amostras retiradas do campo com o intuito de verificar a influência dos grumos existentes na granulometria do material recolhido. Assim a Tabela 2 mostra os resultados obtidos para as granulometrias do material recolhido.

Tabela 2 – Resultados de granulometria

Data coleta =		05/09	06/09	11/09	14/09	19/09	19/09	19/09	22/09	25/09	25/09
Data ensaio =		13/09	12/09	19/09	20/09	25/09	23/09	26/09	02/10	04/10	04/10
Km =		52+740	47+400	52+060	51+925	62+450	67+430	68+050	85+970	44+250	44+260
Peneira	mm	% pass.									
3/4"	19,1	97,60	84,40	92,39	92,43	79,97	86,83	82,44	88,20	97,95	98,44
1/2"	12,7	87,80	68,20	83,92	83,13	74,04	71,99	72,69	74,28	93,23	92,80
3/8"	9,5	80,00	57,70	76,02	75,27	68,29	60,71	63,40	64,15	86,15	85,73
4	4,8	54,90	38,70	56,12	55,60	49,28	33,84	42,28	38,48	59,81	58,33
10	2,00	25,10	18,80	28,37	28,91	24,87	13,93	19,57	13,68	28,61	26,32
200	0,074	0,20	0,00	0,45	0,19	0,11	0,08	0,35	0,07	0,45	0,25
Data coleta =		26/09	27/09	28/09	05/10	05/10	05/10	05/10	09/10	16/10	17/10
Data ensaio =		04/10	03/10	06/10	11/10	11/10	12/10	10/10	15/10	19/10	20/10
Km =		62+040	42+030	55+180	24+580	25+330	28+660	25+250	23+810	22+900	17+290
Peneira	mm	% pass.									
3/4"	19,1	94,99	94,87	93,35	93,35	96,40	84,93	93,12	91,93	92,59	92,85
1/2"	12,7	85,38	83,83	83,75	85,10	85,53	61,99	81,83	79,73	74,91	75,88
3/8"	9,5	77,81	71,79	75,70	77,72	76,08	50,33	71,27	68,09	59,44	65,54
4	4,8	58,11	47,46	51,59	56,27	51,56	28,36	49,23	46,42	35,73	42,35
10	2,00	30,93	21,65	25,77	27,87	22,79	11,59	22,51	19,87	15,60	20,66
200	0,074	0,31	0,16	0,11	0,28	0,14	0,28	0,16	0,13	0,09	0,19

(fonte: o próprio autor)

6.1.1.2 Ensaio de teor de ligante

Os procedimentos utilizados para a determinação da percentagem do ligante seguiram o especificado em DNER-ME 053/94. A qual realiza a diluição e remoção do ligante através de solvente em conjunto com a utilização de equipamento rotatório, conforme ilustrado na Figura 4. A Tabela 3 apresenta os resultados encontrados para a granulometria, após a remoção do ligante, e para o teor de ligante.

Figura 4 – Ensaio de teor de ligante



(fonte: o próprio autor)

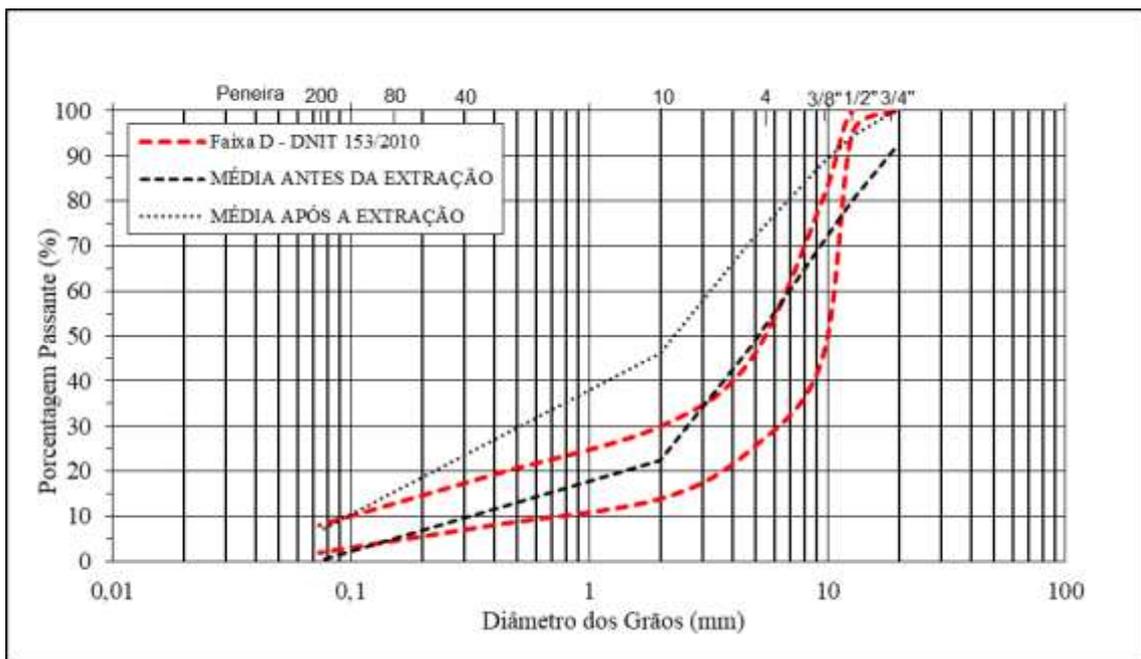
Tabela 3 – Resultados de teor de ligante e granulometria por extração centrífuga

Data coleta =	05/09	06/09	11/09	14/09	19/09	19/09	19/09	22/09	25/09	25/09
Data ensaio =	13/09	12/09	19/09	20/09	25/09	23/09	26/09	02/10	04/10	04/10
Km =	52+740	47+400	52+060	51+925	62+450	67+430	68+050	85+970	44+250	44+260
Teor (%) =	4,10%	4,35%	4,11%	4,04%	4,48%	3,38%	4,37%	4,16%	4,70%	4,68%
Peneira	mm	% pass.								
3/4"	19,1	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	97,85	90,15	98,17	95,94	98,97	89,92	94,97	92,98	93,37
3/8"	9,5	95,57	84,42	94,40	92,33	97,84	81,55	88,65	83,99	94,96
4	4,8	80,38	66,65	79,61	78,61	86,76	56,87	75,29	67,83	80,26
10	2,00	51,97	43,77	49,43	50,97	60,22	34,87	49,89	41,75	53,08
200	0,074	7,86	5,65	5,59	5,83	8,18	4,25	6,47	7,85	10,71
Data coleta =	26/09	27/09	28/09	05/10	05/10	05/10	05/10	09/10	16/10	17/10
Data ensaio =	04/10	03/10	06/10	11/10	11/10	12/10	10/10	15/10	19/10	20/10
Km =	62+040	42+030	55+180	24+580	25+330	28+660	25+250	23+810	22+900	17+290
Teor (%) =	4,07%	4,44%	4,41%	3,67%	4,01%	3,00%	4,01%	3,69%	3,22%	3,12%
Peneira	mm	% pass.								
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	97,15	97,17	97,88	96,07	96,40	89,25	96,88	88,94	87,60
3/8"	9,5	92,16	87,91	91,17	90,75	91,57	76,75	91,58	79,67	74,99
4	4,8	77,28	67,36	71,79	73,11	75,23	54,82	75,93	62,77	55,70
10	2,00	53,64	43,71	46,87	47,29	50,22	32,00	49,37	39,13	34,13
200	0,074	6,24	6,04	6,76	7,24	8,35	4,29	8,67	5,60	3,76

(fonte: o próprio autor)

A partir das Tabelas 2 e 3, que determinaram a granulometria do agregado antes e após a extração do betume, foi possível elaborar a curva granulométrica média do agregado fresado apresentada, na Figura 5 a seguir, conjuntamente com a faixa D do DNIT 153/2010 – ES.

Figura 5 – Curva granulométrica média do material fresado



(fonte: o próprio autor)

6.1.1.3 Ensaio de determinação da abrasão *Los Angeles*

Visto que os agregados estão sujeitos a quebras e abrasão durante os processos de manuseio dos materiais, execução da mistura asfáltica e ação do tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2008), realizou-se o ensaio para determinação da abrasão *Los Angeles*. Este ensaio consiste no desgaste sofrido pelo agregado graúdo juntamente a uma carga abrasiva de 4584 ± 25 gramas, dentro de um tambor metálico, denominado *Los Angeles*, destacado na Figura 6, e submetido a 500 revoluções, conforme especificado através da norma DNER-ME 035/98. O desgaste é expressado pelo percentual, em peso, do material passante na peneira de abertura 1,7mm após o ensaio. O valor obtido para este ensaio foi de 76,31%, 84,36% e 75,93% para as amostras 62, 67 e 68 respectivamente, tendo como média o valor de 78,87%. Resultado, considerado aceitável, uma vez que para este ensaio a norma DNIT 153/2010 – ES especifica um valor mínimo de 40% para aceitação do material na utilização de um PMF.

Figura 6 – Ensaio de determinação da abrasão *Los Angeles*



(fonte: o próprio autor)

6.1.1.4 Ensaio de índice de forma

Este ensaio consiste no peneiramento do agregado por peneiras com crivos de aberturas circulares e crivos com abertura retangular. A determinação do índice de forma, descrito pelo método DNER-ME 086/94, é função da forma das partículas cuja variação do índice é entre 0,0 e 1,0 sendo considerada 1,0 para agregados cúbicos e 0,0 para lamelares. O índice de forma encontrado para este agregado foi de, 0,732, 0,778 e 0,770 para as amostras 62, 67 e 68 respectivamente, e assim resultando o valor médio de 0,760. A norma DNIT 153/2010 – ES determina o valor mínimo de 0,5 para a anuência da sua utilização em PMFs, sendo assim o material está apto para utilização em função do índice de forma.

6.1.1.5 Ensaio de durabilidade

De maneira a obter as características do agregado quanto a desintegração química, aplicou-se os procedimentos indicados em DNER 089/94, com a utilização de solução saturada de sódio, aplicados em cinco ciclos de dezesseis horas em temperatura de 21°C com posterior secagem em estufa a 110°C. Após os cinco ciclos, é realizada a lavagem do material com cloreto de bário e por fim, determinada a perda de massa pelo peneiramento de cada uma das frações de agregado. A perda de material obtida foi de 5,80%, 8,22% e 10,11% para as amostras 62, 67 e 68 e assim um valor médio de 8,04%, sendo especificado pela norma DNIT 153/2010 – ES um valor máximo de 12%.

6.1.1.6 Ensaio de equivalente de areia

O ensaio de equivalente de areia, executado conforme a norma DNER 054/97, determina a proporção de material argiloso em suspensão em solução de cloreto de cálcio-glicerina-formaldeído para uma determinada quantidade de agregado passante na peneira de 4,8mm. A Figura 7 demonstra os equipamentos utilizados para realização dos ensaios, que apresentaram os resultados de 85,71%, 87,38% e 87,37% para as amostras 62, 67 e 68 respectivamente, obtendo-se o valor médio de 86,82%, considerado satisfatório, visto que a norma DNIT 153/2010 – ES estabelece um valor mínimo de 55% para o equivalente de areia.

Figura 7 – Ensaio de equivalente de areia



(fonte: o próprio autor)

6.1.1.7 Ensaio de adesividade.

O ensaio de adesividade visa determinar a resistência a ação da água de emulsões asfálticas, para isso foi utilizada a norma NBR 6300/2009 que descreve os métodos de ensaio para

emulsões asfálticas catiônicas. Os procedimentos consistem na mistura de 300g de agregado passante na peneira 19mm e retido na peneira 12,7mm. A seguir, adiciona-se 25g de emulsão asfáltica tipo RL-1C e mistura-se até que todas as partículas estejam com sua superfície completamente cobertas pela emulsão. Após o procedimento de cura do material, ele é imergido em água por um período de 72h a uma temperatura de (40 ± 1) °C. A análise deste ensaio é realizada de maneira visual de modo a estimar o percentual da área de agregado que preservou a camada asfáltica. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos após a imersão, onde não se constatarem problemas de adesividade. Entretanto, cabe salientar que no caso do agregado fresado já possuir uma película de ligante asfáltico, a percepção visual das falhas na adesividade da emulsão ao agregado se viu prejudicada.

Figura 8 – Ensaio de adesividade



(fonte: o próprio autor)

6.1.2 Agregado basáltico

O agregado basáltico foi utilizado como material adicional para complementação da granulometria. Oriundo da cidade de Santo Antônio da Patrulha, este material é do mesmo local de onde foram extraídos os materiais presentes na mistura fresada. Têm como objetivo na utilização deste agregado à correção do traço da mistura de modo a atender ao especificado na

faixa D do DNIT 153/2010 – ES. Este material foi caracterizado de acordo com os mesmos ensaios descritos para o agregado fresado. A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados encontrados para a caracterização deste agregado:

Tabela 4 – Resultados da caracterização dos agregados empregados

Ensaio	Resultado
Abrasão "Los Angeles"	88,84%
Equivalente de areia	79,30%
Índice de forma	0,79
Durabilidade	5,30%

(fonte: o próprio autor)

6.2 MATERIAIS ASFÁLTICOS

O material asfáltico utilizado no presente trabalho foi fornecido por empresa especializada na produção deste tipo de material, tendo sido selecionada a emulsão asfáltica de ruptura lenta (RL-1C) para a execução deste projeto, uma vez que a mesma é a mais indicada para a produção do PMF.

Cabe salientar que, com base no estudo realizado por David (2006), optou-se pela não utilização da emulsão denominada como agente rejuvenecedor emulsionado (ARE), uma vez que as misturas produzidas nesta pesquisa apresentaram resultados inferiores às misturas produzidas com a emulsão do tipo RL-1C.

6.2.1 Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica foi disponibilizada no mês de abril de 2018 em garrafas PET, totalizando a quantidade de 10 litros. O material foi fornecido por uma empresa especializada na produção de materiais asfálticos, a mesma realizou a caracterização do material apresentada através do seu certificado de qualidade, o qual continha os ensaios descritos subsequentemente.

6.2.1.1 Viscosidade Saybolt-Furol

A viscosidade dos materiais asfálticos tem grande influência para a determinação da consistência necessária para atingir a cobertura dos agregados durante a realização da mistura. O ensaio de viscosidade Saybol-Furol, especificado para emulsões através da norma NBR 14491/2007, obtém uma medida empírica de viscosidade obtida pelo tempo necessário para que

60mL de emulsão escoem através de orifício com dimensões padronizadas. Este ensaio foi realizado a temperatura de 25°C, e obteve o resultado de 17 s tendo atendido à especificação máxima de 70 s.

6.2.1.2 Ensaio de peneiramento

O ensaio de peneiramento visa determinar, em porcentagem, a quantidade de resíduos existentes nas emulsões asfálticas que são retidos na peneira de abertura de 0,84 mm. Este ensaio é normatizado através da NBR 14393/2012, onde é prescrita a passagem de 1000 mL de emulsão pela peneira citada anteriormente. O limite máximo de percentual de peso retido é de 0,1% tendo sido registrado o resultado de 0,01% para este ensaio

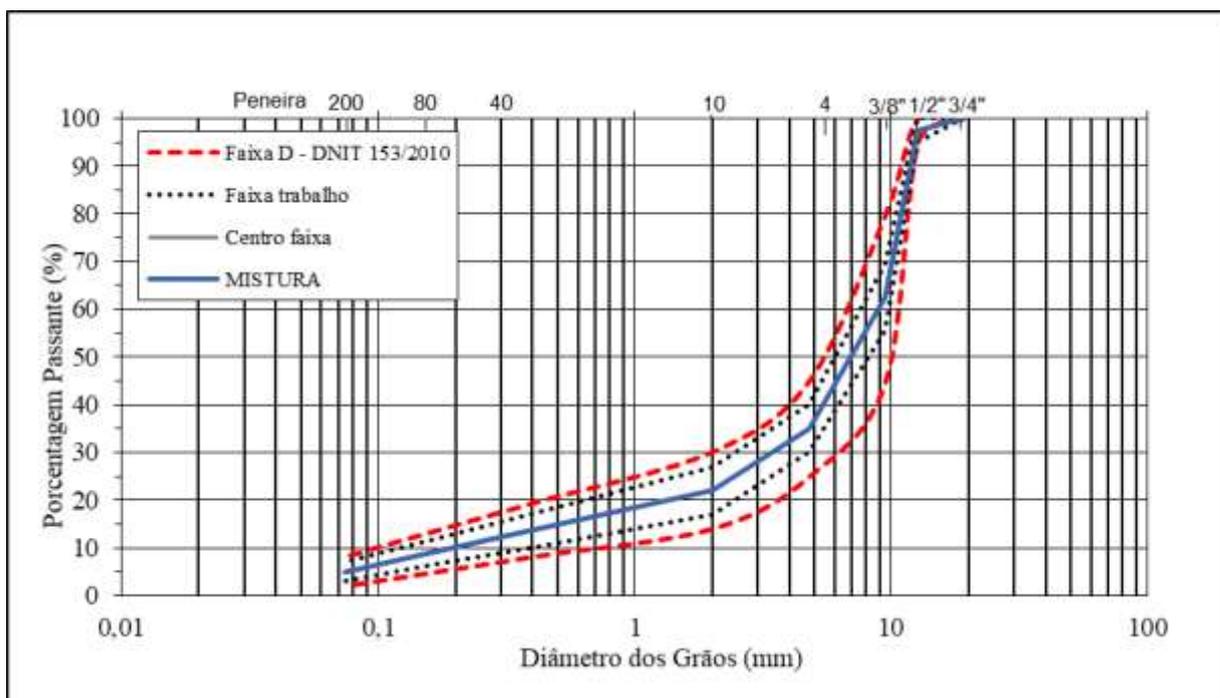
6.2.1.3 Ensaio de resíduo por evaporação

Este ensaio determina o percentual de ligante asfáltico presente em emulsões asfálticas por meio da evaporação da água. A norma NBR 14376/2007 define os procedimentos para realização do ensaio onde, aproximadamente 100 g de emulsão são aquecidas para que ocorra a evaporação do solvente, após obter a constância de peso, pode-se determinar a quantidade de ligante residual. O mínimo exigido (60%) para o ensaio de resíduo por evaporação foi atendido tendo sido obtido o resultado de 61,6%.

6.3 PROJETO DE MISTURA ASFÁLTICA

Dispondo-se do conhecimento das características dos materiais, deu-se início à definição do projeto de mistura asfáltica fria. Inicialmente, não foram encontradas composições possíveis de enquadramento na faixa granulométrica, para a utilização da faixa D, especificada pela norma DNIT 153/2010 – ES. Uma vez que, não se encontrou materiais à disposição, de mesma origem do agregado fresado, para a realização da pesquisa, foi escolhida a composição, conforme a Figura 9, com a utilização de 40% de agregado fresado e o restante com agregado virgem para enquadramento no centro da respectiva faixa.

Figura 9 – Granulometria de projeto



(fonte: o próprio autor)

Destaca-se que o percentual de 40%, foi o escolhido em função do percentual que representa a maior utilização de agregado fresado que consiga se enquadrar ao centro faixa D para PMF. Ressalta-se que valores superiores a este, necessitariam de remoção de material fresado em algumas frações.

Posteriormente à definição da granulometria de projeto, foram determinados os teores preliminares de asfalto e de emulsão asfáltica. Este processo ocorreu seguindo a metodologia descrita por Duriez, a qual trata da proporção dos diferentes tamanhos de agregados ponderadas de acordo com a sua superfície específica, e adaptada para as peneiras brasileiras pela fórmula de Vogt (BERNUCCI *et al.*, 2008), conforme apresentada pela fórmula 1:

$$100. \Sigma = 0,07. P_4 + 0,14. P_3 + 0,33. P_2 + 0,81. P_1 + 2,7. S_3 + 9,15. S_2 + 21,9. S_1 + 135. F \quad (\text{fórmula 1})$$

Sendo:

Σ = superfície específica de agregados (m^2/g);

P_4 = massa do material retido entre as peneiras 2'' – 1'' (g);

- P_3 = massa do material retido entre as peneiras 1" – 1/2" (g);
 P_2 = massa do material retido entre as peneiras 1/2" – N° 4 (g);
 P_1 = massa do material retido entre as peneiras N° 4 – N° 10 (g);
 S_3 = massa do material retido entre as peneiras N° 10 – N° 40 (g);
 S_2 = massa do material retido entre as peneiras N° 40 – N° 80 (g);
 S_1 = massa do material retido entre as peneiras N° 80 – N° 200 (g);
 F = massa do material passante na peneira N° 200 (g).

Após o cálculo da superfície média dos agregados, obtém-se o teor de asfalto residual em relação à massa total dos agregados pela expressão de Duriez, apresentada pela fórmula 2:

$$p = k \cdot \Sigma \cdot 0,2 \quad (\text{fórmula 2})$$

Sendo:

- p = teor de asfalto residual (%);
 Σ = superfície específica de agregados (m^2/g);
 k = módulo de riqueza (3,2).

O módulo de riqueza foi escolhido conforme a Quadro 2 proposta por Santana (1993), tendo sido adotado o valor de k igual a 3,2 por representar o valor médio de k destinadas as camadas de revestimentos e de *binder* em PMFSD.

Quadro 2 – Sugestões para o módulo de riqueza (k)

CAMADA	TIPO DE PMF	k
Regularização	PMFA - PMFSD	2,0 - 3,0
Base e Binder	PMFA - PMFSD	2,5 - 3,5
Revestimento	PMFA - PMFSD	2,8 - 4,0
Revestimento	PMFD	3,2 - 4,5

(fonte: adaptado de Santana, 1993)

Por fim, as fórmulas 3 e 4 apresentam as correções para a determinação dos teores de asfalto e de emulsão asfáltica preliminares:

$$p' = \frac{100.p}{100+p} \quad (\text{fórmula 3})$$

Sendo:

p' = teor de asfalto preliminar (%);

p = teor de asfalto residual (%).

$$p'_{EA} = \frac{100.p'}{t} \quad (\text{fórmula 4})$$

Sendo:

p'_{EA} = teor de emulsão asfáltica preliminar (%);

p' = teor de asfalto preliminar (%);

t = teor percentual em massa de asfalto na emulsão asfáltica (%).

Selecionado os teores preliminares, iniciou-se a etapa de separação dos agregados nas frações constituintes do projeto através dos processos de: peneiramento, lavagem e secagem em estufa à temperatura de 60°C. De acordo com a granulometria de projeto, foi determinado o percentual de agregado retido em cada fração de peneira necessário para moldagem de um corpo de prova (CP). Esta etapa tem como objetivo garantir o controle da granulometria dos CPs.

Com posse dos materiais nas condições ideais para a realização dos procedimentos e ensaios, determinou-se o teor de ligante de projeto através da metodologia Marshall, especificada para misturas fria com emulsão asfáltica por DNER – ME 107/94. Neste procedimento foram dosadas cinco misturas tendo como ponto de partida o teor preliminar de emulsão asfáltica de início e alterando-se os teores de moldagem para $\pm 1\%$ e $\pm 2\%$. Para cada teor, é misturado quantidade suficiente para a confecção de quatro corpos de prova, sendo três deles moldados pelo compactador Marshall e um sendo separado, sem o processo de moldagem, para determinação da massa específica máxima através do método RICE conforme especificado na norma NBR 15619/2016.

Vale destacar que em virtude da pouca trabalhabilidade e envolvimento deficitário da emulsão sobre os agregados, pode ser adicionado um percentual de água ao agregado de maneira a facilitar o processo de mistura. Este procedimento de facilitação da trabalhabilidade é controlado visualmente, conforme indicado por Santana (1993), tendo como objetivo buscar o menor percentual de água que viabilize a execução da mistura.

Após o processo de mistura, o material é reservado em temperatura ambiente pelo período de uma hora para que ocorra a cura. Passado este período, preenche-se o molde com a mistura e se realiza a compactação, aplicando 75 golpes por face de corpo de prova, e coloca-se o molde em estufa à temperatura de 60°C pelo período de 24 horas seguidas de 2 horas de resfriamento em temperatura ambiente. Subsequentemente, extrai-se o CP do molde e determina-se a altura da amostra por quatro medidas realizadas em posições diametralmente opostas.

Neste momento, é realizada a determinação da massa específica aparente, obtida através dos dados de massa seca ao ar, massa imersa em água e massa saturada com superfície seca, conforme a fórmula 5 indicada na norma NBR 15573/2012.

$$Mea = \frac{A}{C - B} \cdot 0,9971 \quad (\text{fórmula 5})$$

Sendo:

Mea = massa específica aparente do corpo de prova (g/cm³);

A = massa do corpo de prova seco ao ar (g);

B = massa do corpo de prova imerso em água (g);

C = massa do corpo de prova saturado com superfície seca (g).

Com as massas específicas aparente e máxima teórica obtidas, é possível determinar os seguintes parâmetros volumétricos do CP: volume de vazios (Vv), que representa o ar presente na mistura; vazios do agregado mineral (VAM), que corresponde à soma dos vazios de ar e ligante asfáltico e a relação betume-vazios (RBV), a qual estabelece a proporção de ligante efetivo presente nos vazios do agregado mineral. A seguir estão apresentadas as fórmulas 6, 7 e 8 utilizadas para a definição dos três parâmetros respectivamente:

$$V_v = \frac{M_{em} - M_{ea}}{M_{em}} \quad (\text{fórmula 6})$$

Sendo:

V_v = volume de vazios existente no corpo de prova (%);

M_{ea} = massa específica aparente do corpo de prova (g/cm^3);

M_{em} = massa específica máxima do corpo de prova (g/cm^3).

$$VAM = V_v + \frac{p}{M_{eb}} \quad (\text{fórmula 7})$$

Sendo:

VAM = vazios do agregado mineral existente no corpo de prova (%);

V_v = volume de vazios existente no corpo de prova (%);

p = teor de asfalto residual presente no corpo de prova (%)

M_{eb} = massa específica do betume presente na emulsão asfáltica (g/cm^3).

$$RBV = \frac{VAM - V_v}{VAM} \quad (\text{fórmula 8})$$

Sendo:

RBV = relação betume-vazios do corpo de prova (%);

VAM = vazios do agregado mineral existente no corpo de prova (%);

V_v = volume de vazios existente no corpo de prova (%).

Em seguida, para a determinação dos parâmetros mecânicos de estabilidade e fluência, os CPs são aquecidos, em estufa, à temperatura de 40°C pelo período de 2 horas e posteriormente colocados na prensa do ensaio. A leitura da estabilidade é realizada por um extensômetro dentro de um anel dinanométrico representando a carga necessária para que ocorra o rompimento do corpo de prova. Enquanto que a medida de fluência é obtida através de outro extensômetro localizado em um dos pinos guia e representa a deformação no momento de ruptura do CP.

Destaca-se que foram necessárias a utilização de duas prensas na realização dos ensaios de estabilidade e fluência apresentada na Figura 10 e Figura 11, as quais foram utilizadas nos ensaios dos teores preliminares e do teor de projeto respectivamente.

Figura 10 – Prensa utilizada para estabilidade e fluência nos teores preliminares



(fonte: o próprio autor)

Figura 11 – Prensa utilizada para estabilidade e fluência no teor de projeto



(fonte: o próprio autor)

Vale ressaltar, que a estabilidade do PMF, para misturas com alto teor de vazios, está relacionada prioritariamente ao atrito entre os agregados, tendo um pequeno auxílio da coesão desenvolvida pelo ligante asfáltico que os envolve. Ainda, é muito importante para a estabilidade deste tipo de mistura, a pressão exercida pelo confinamento existente no pavimento, mas não representadas nos ensaios do tipo Marshall (SANTANA, 1993).

A definição do teor de projeto foi obtida, conforme indicado Santana (1993), através da determinação da maior massa específica aparente existente para o teor de emulsão preliminar e demais teores de moldagem. O teor foi obtido através de uma função quadrática, tendo o teor de ligante no eixo das abscissas e a massa específica aparente no eixo das ordenadas. Desta forma, o vértice da parábola, determinado pelas fórmulas 9 e 10, representam, respectivamente, o teor de projeto de emulsão asfáltica e a massa específica aparente máxima esperada para este teor da mistura asfáltica.

$$X_v = - \frac{b}{2.a} \quad (\text{fórmula 9})$$

Sendo:

X_v = teor de projeto da mistura asfáltica (%);

a = coeficiente x^2 da função quadrática;

b = coeficiente x^1 da função quadrática.

$$Y_v = - \frac{b^2 - 4.a.c}{4.a} \quad (\text{fórmula 10})$$

Sendo:

Y_v = massa específica aparente máxima esperada para o teor de projeto (g/cm^3);

a = coeficiente x^2 da função quadrática;

b = coeficiente x^1 da função quadrática;

c = coeficiente x^0 da função quadrática;

De posse do teor de projeto, foram determinadas novamente as características volumétricas e mecânicas conforme a metodologia Marshall, descrita através da norma DNER – ME 107/94. Assim como a adição dos ensaios de Resistência à Tração e de Módulo de Resiliência, conforme explicitado a seguir.

6.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Segundo Bernucci *et al.* (2008), devido à dificuldade de se obter a resistência à tração de maneira direta, diversos métodos indiretos foram elaborados. O ensaio desenvolvido por Carneiro (1943) para a determinação indireta da resistência à tração, inicialmente para concreto de cimento Portland, através da compressão diametral, foi adotado desde 1972 para a caracterização de misturas asfálticas em corpos de prova (CP) cilíndricos moldados de acordo com o método Marshall.

Este ensaio, posteriormente normatizado pela norma DNIT 136/2010 – ME, consiste na aplicação de cargas de compressão, através de dois frisos metálicos, acoplados a uma prensa, em contato com a superfície cilíndrica do corpo de prova até que ocorra a sua ruptura, segundo um plano diametral vertical. A temperatura de realização do ensaio é 25°C, onde, os CPs devem ser colocados em sistema de regulação de temperatura duas horas antes da realização dos ensaios. De acordo com DNIT 136/2010 – ME, o valor de resistência à tração é então obtido através da fórmula 11:

$$RT = \frac{2 \cdot F_{RT}}{100 \cdot \pi \cdot D \cdot H} \quad (\text{fórmula 11})$$

Sendo:

RT = resistência à tração (MPa);

F_{RT} = carga de ruptura (N);

D = diâmetro do corpo de prova (cm);

H = altura do corpo de prova (cm).

6.5 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A norma DNIT 135/2010 – ME (p.1), a qual propõe o método para execução do ensaio de determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas, define o módulo de resiliência de misturas asfálticas como “a relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada”.

Ainda, conforme DNIT 135/2010 – ME, os equipamentos componentes deste ensaio são: prensa com calha de apoio e frisos de aplicação de carga, sistema de carregamento pneumático com regulador de pressão a ar comprimido com temporizador eletrônico para controle da frequência de aplicação de carga e sistema de medição de deformação através de transdutores mecano-eletromagnéticos tipo LVDT (*Linear variable differential transformer*). Com os dados obtidos, o módulo de resiliência é calculado através da fórmula 12:

$$MR = \frac{F_{MR}}{100 \cdot \Delta H} \cdot (0,9976 \cdot \mu + 0,2692) \quad (\text{fórmula 12})$$

Sendo:

MR = módulo de resiliência (MPa);

F_{MR} = carga repetida aplicada diametralmente ao corpo de prova (N);

Δ = deformação elástica ou resiliente registrada no microcomputador, para aplicações da carga (F_{MR}) (cm);

H = altura do corpo de prova (cm);

μ = coeficiente de Poisson (0,3).

Para fins desta pesquisa, utilizou-se o sistema SEEPAV para o cálculo do módulo de resiliência da mistura asfáltica. Destaca-se que este sistema, solicita a entrada do valor de RT para a determinação da carga F a ser aplicada no CP de maneira que não ocorra a ruptura da amostra durante o ensaio de MR. Desta forma, foram determinadas a RT de dois CPs de maneira a inserir a média dos resultados obtidos no sistema SEEPAV.

7 RESULTADOS

Este capítulo discorre sobre os resultados obtidos, realizando a análise da determinação do teor de emulsão preliminar, das características volumétricas, do teor de projeto e das características mecânicas da mistura asfáltica obtidas para os teores preliminares e para o teor de projeto.

7.1 CARACTERÍSTICAS DOS TEORES PRELIMINARES

Esta etapa se refere aos ensaios e procedimentos realizados com o objetivo de definir um teor de emulsão de projeto. Este percentual é obtido através dos procedimentos descritos no item 6 e das características aqui apresentadas:

7.1.1 Teor de emulsão preliminar e de água de mistura

Conforme elucidado no item 6.3, o teor de emulsão preliminar foi determinado a partir da metodologia descrita por Duriez, onde obteve-se o valor de 8,76% e consequentemente um teor de ligante residual de 5,4%.

Não é o caso do presente trabalho, entretanto cabe salientar que, nesta etapa, poderia ter sido realizada a consideração do ligante asfáltico existente no agregado fresado, através da subtração do seu percentual do percentual de ligante residual determinado através da fórmula 2.

A fim de facilitar sua trabalhabilidade e melhora no envolvimento da emulsão asfáltica sobre o agregado, foi adicionado água ao agregado previamente à execução da mistura asfáltica. Foram testados os teores de 0%, 0,5% e 1%, tendo sido selecionado o teor de 1% de água sobre o peso de agregado.

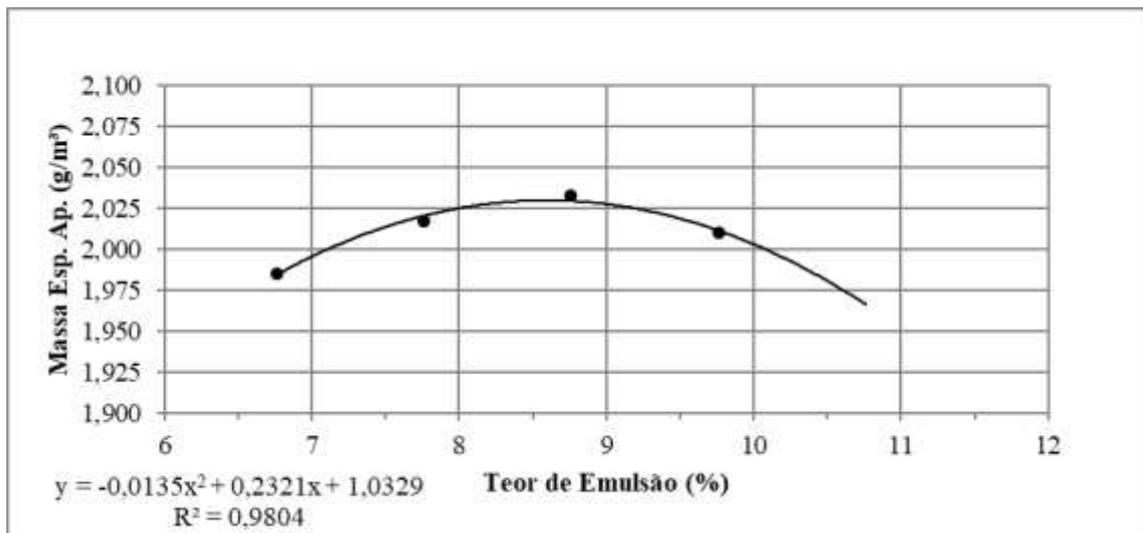
7.1.2 Características volumétricas

Todos os corpos de prova (CP) moldados passaram por esta etapa de caracterização volumétrica, através da determinação da massa específica aparente, da massa específica

máxima medida, do volume dos vazios, do volume nos agregados minerais (VAM) e da relação betume-vazios (RBV).

Na Figura 12, encontra-se os valores obtidos para a média das massas específicas aparentes para os teores de moldagem. Onde fica elucidado, o crescimento do índice até próximo do valor de 8,5%, onde ocorre a diminuição do parâmetro com o aumento do teor de emulsão.

Figura 12 – Relação massa específica aparente com o percentual de emulsão

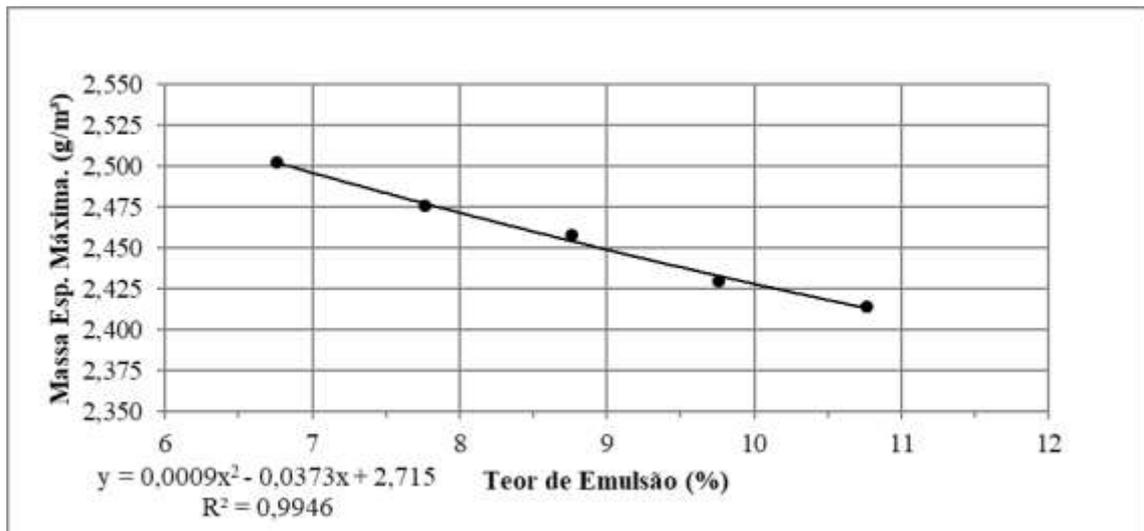


(fonte: o próprio autor)

Destaca-se que este índice é o responsável por determinar o teor de projeto a ser utilizado na mistura através do ponto que maximize a massa específica aparente para esta função. Cabe ressaltar que, neste cálculo, foi desconsiderado o resultado encontrado para o teor de 10,76% em função do aumento do coeficiente de determinação (R^2), de 0,6752 para 0,9804, da função.

Posteriormente, foi realizada a análise da massa específica máxima, conforme a Figura 13 determinada através da metodologia RICE, descrita no item 6.3 e especificado na norma NBR 15619/2016.

Figura 13 – Relação massa específica máxima com o percentual de emulsão

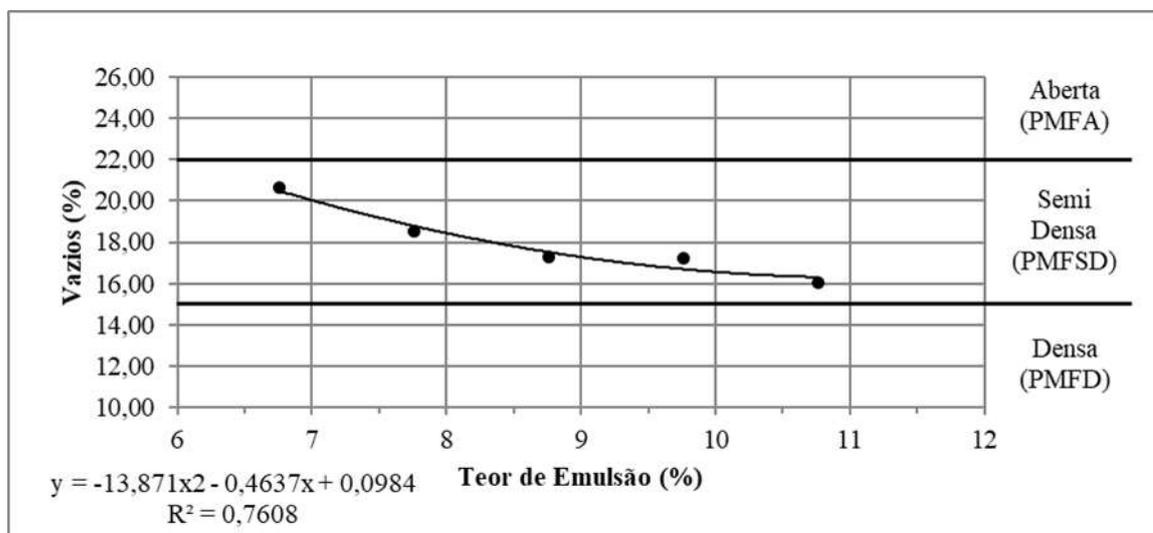


(fonte: o próprio autor)

De acordo com a Figura 13, existe uma redução gradual da massa específica máxima, conforme o aumento do teor de emulsão da mistura. Isso acontece em virtude do crescimento do percentual de asfalto na relação agregado-ligante asfáltico e considerando que o mesmo possui uma massa específica consideravelmente menor do que a dos agregados.

Com posse dos dados de massa específica aparente e massa específica máxima, foi determinado, através da fórmula 6, o volume de vazios da mistura. O qual está apresentado na Figura 14, a relação com o percentual de emulsão asfáltica

Figura 14 – Relação volume de vazios com o percentual de emulsão

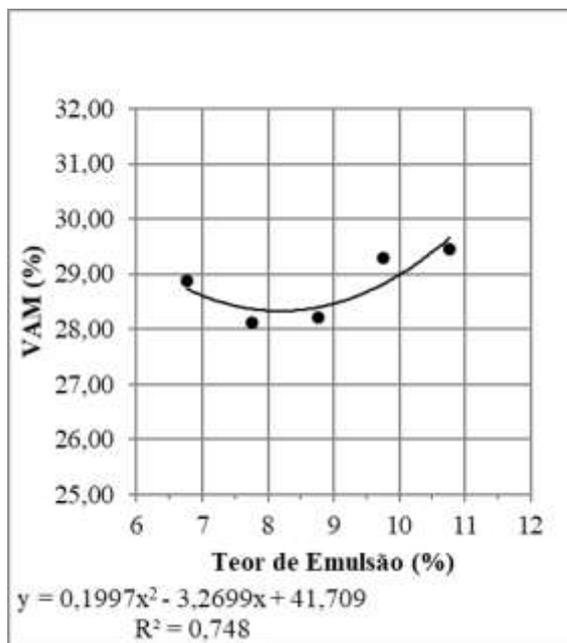


(fonte: o próprio autor)

Através da Figura 14 é possível verificar uma redução do volume de vazios com o aumento do teor de emulsão. Este fato está relacionado ao preenchimento, com ligante asfáltico, dos vazios de ar na mistura. Além disso, com base na classificação apresentada na Figura 14, definida por Santana (1993), a mistura asfáltica produzida se enquadra na faixa descrita como Semidensa, o que é coerente com o módulo de riqueza (k) adotado no item 6.3.

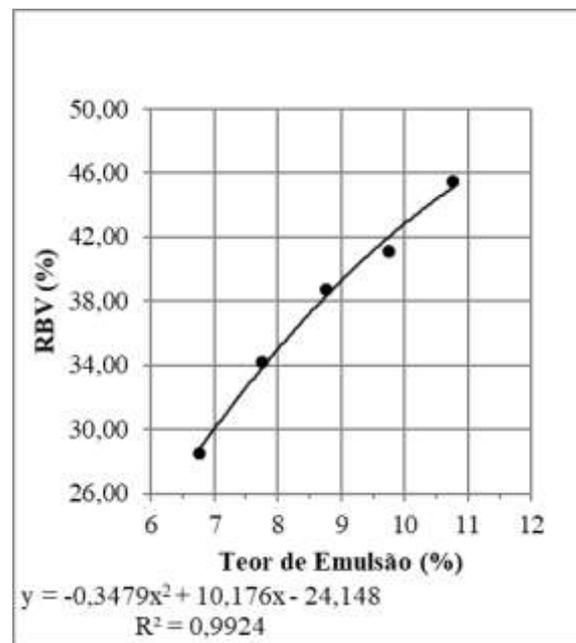
Finalizando a etapa de análises das características volumétricas, estão apresentadas as Figuras 15 e 16, as quais descrevem a relação do VAM e do RBV com o percentual de emulsão asfáltica para a mistura.

Figura 15 – Relação VAM com o percentual de emulsão



(fonte: o próprio autor)

Figura 16 – Relação RBV com o percentual de emulsão



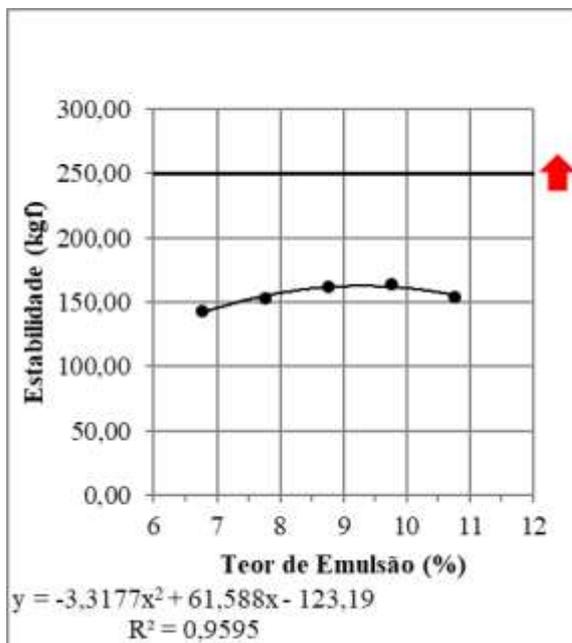
(fonte: o próprio autor)

Destaca-se que enquanto os resultados de VAM apresentaram seus menores valores nos percentuais intermediários, o que apoia a análise da massa específica aparente, os valores obtidos para a RBV apresentaram um crescimento com o aumento do teor de emulsão, o que consequentemente diminui a quantidade de ar presente na mistura causando assim o aumento da RBV.

7.1.3 Características mecânicas

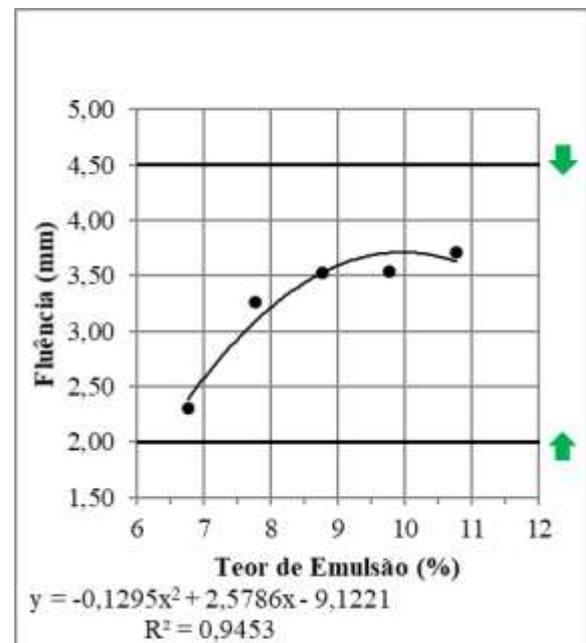
Para a etapa de determinação do teor de moldagem, foram realizados os ensaios para a determinação da estabilidade e da fluência dos CPs em todos os percentuais estudados. As Figuras 17 e 18 apresentam os resultados de estabilidade e de fluência, respectivamente, os quais foram executados conforme especificado na norma DNER – ME 107/94.

Figura 17 – Relação estabilidade com o percentual de emulsão



(fonte: o próprio autor)

Figura 18 – Relação fluência com o percentual de emulsão



(fonte: o próprio autor)

A estabilidade da mistura asfáltica, definida como a carga máxima que o corpo de prova é capaz de suportar até o momento da sua ruptura, evidenciou uma linearidade dos resultados obtidos com pouca variação em função do teor de emulsão, apresentando um mínimo ganho nos teores intermediários. Além disso, destaca-se que este parâmetro não atingiu os valores mínimos exigidos para misturas asfálticas pré-misturadas à frio (PMF), de 250 kgf pela norma DNER – ME 107/94, e ilustrados na Figura 17 através da seta vermelha a qual indica o não atendimento do parâmetro.

No que se refere à determinação da fluência da mistura asfáltica, medida que representa o deslocamento máximo obtido no momento da aplicação da carga máxima ao corpo de prova, os resultados apresentaram boa aproximação, menos para o teor de 6,76% de emulsão onde

foram obtidos valores consideravelmente inferiores aos demais teores. Vale ressaltar os limites mínimos (2mm) e máximos (4,5mm) para PMF, conforme indicados pela norma DNER – ME 107/94, ilustrados na Figura 18 pelas setas verdes, as quais sinalizam o enquadramento do parâmetro a respectiva normativa.

7.2 CARACTERÍSTICAS DO TEOR DE PROJETO

Esta etapa se refere aos procedimentos realizados com o teor de emulsão de projeto definido, onde, foram determinadas novamente as características volumétricas e mecânicas da mistura.

7.2.1 Teor de projeto

Conforme explicitado no item 6.3, após a definição da função quadrática para o teor preliminar e demais teores de moldagem, o teor de projeto foi determinado através da aplicação das fórmulas 9 e 10 à função quadrática $(-0,0135.x^2+0,2321.x+1,0329)$ apresentada na Figura 12 do item 7.1.2.

$$X_v = - \frac{b}{2.a} \quad (\text{fórmula 9})$$

Sendo:

X_v = teor de projeto da mistura asfáltica (%);

a = coeficiente x^2 da função quadrática;

b = coeficiente x^1 da função quadrática.

$$Y_v = - \frac{b^2 - 4.a.c}{4.a} \quad (\text{fórmula 10})$$

Sendo:

Y_v = massa específica aparente máxima esperada para o teor de projeto (g/cm^3);

a = coeficiente x^2 da função quadrática;

b = coeficiente x^1 da função quadrática;

c = coeficiente x^0 da função quadrática;

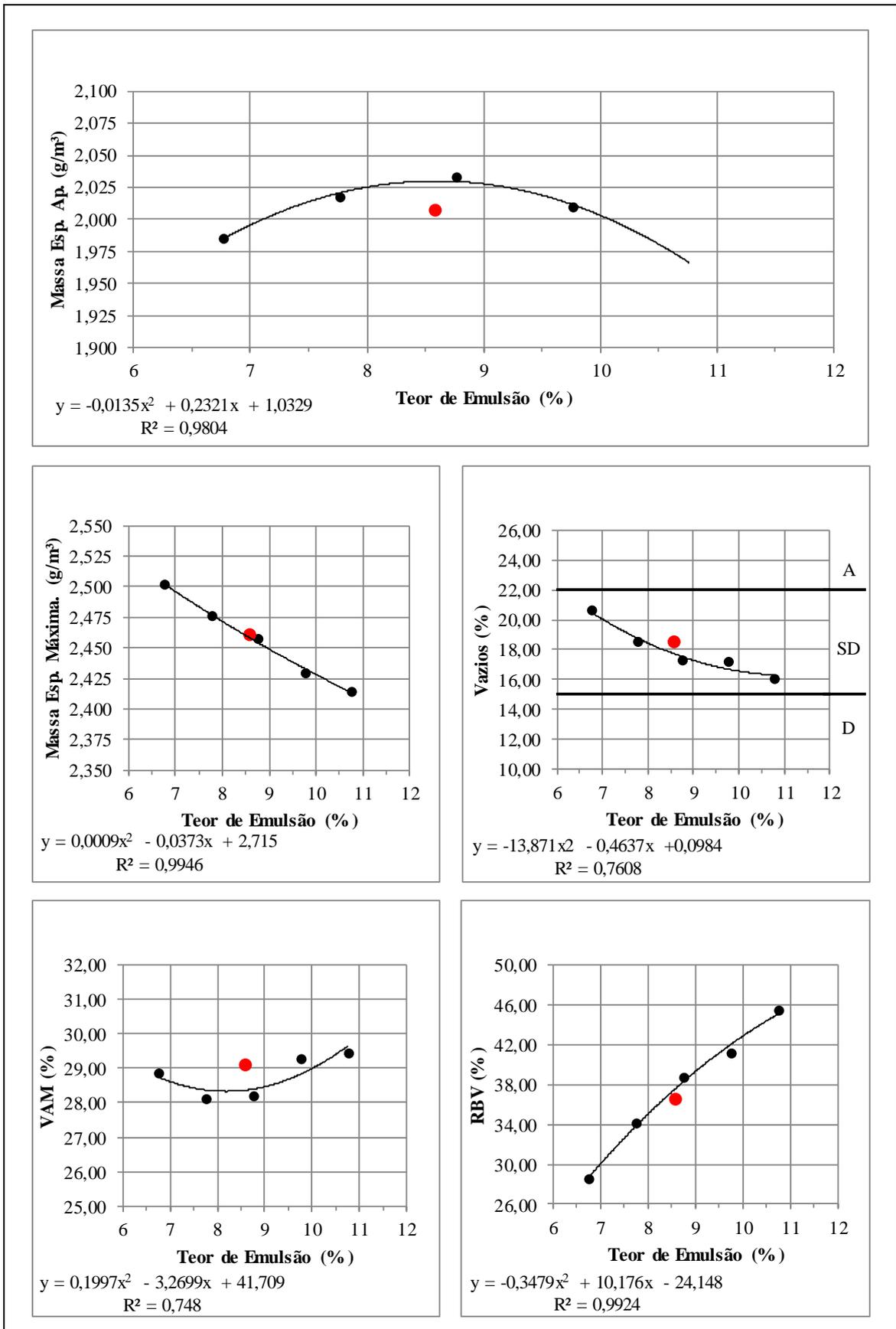
Desta forma, o teor de projeto adotado para a mistura asfáltica foi de 8,60%. Vale destacar que, caso não houvesse sido retirado um dos pontos, em função do aumento do coeficiente de determinação, o teor de projeto da mistura seria de 9,58%

A partir da definição do teor de projeto foi realizada a moldagem de oito CPs com este percentual de emulsão asfáltica. Todos passaram pela etapa de caracterização volumétrica e posteriormente foram divididos em três CPs para ensaio de estabilidade e fluência, dois para determinação da resistência à tração na compressão diametral (RT) e os últimos três com destino à realização dos ensaios para obtenção dos valores de módulo de resiliência (MR). Destaca-se que em virtude do ensaio de MR não ser destrutivo, os três CPs destinados a este ensaio, posteriormente, também terão a RT determinada.

7.2.2 Características volumétricas

Após o processo de moldagem, os oito CPs tiveram suas características volumétricas determinadas, as quais estão apresentadas através das suas médias, identificadas em vermelho, nos seus respectivos gráficos apresentados ao longo do item 7.1 e resumidos na Figura 19.

Figura 19 – Relação das características volumétricas com o teor de projeto



(fonte: o próprio autor)

Destaca-se que a Massa Específica Aparente apresentou valores abaixo ao esperado para o respectivo teor, visto que o teor de projeto visa a sua maximização e a mesma apresentou resultados inferiores a três dos quatro teores preliminares considerados. Enquanto que, a Massa Específica Máxima, o Volume de Vazios e a Relação Betume-Vazios, apresentaram grande proximidade com os resultados esperados, uma vez que se encontram próximos a sua respectiva linha de tendência. Ainda, o vazio do agregado mineral apresentou uma significativa mudança nos seus valores esperados, pois o mesmo apresentou resultados mais próximos dos seus teores preliminares mais distantes.

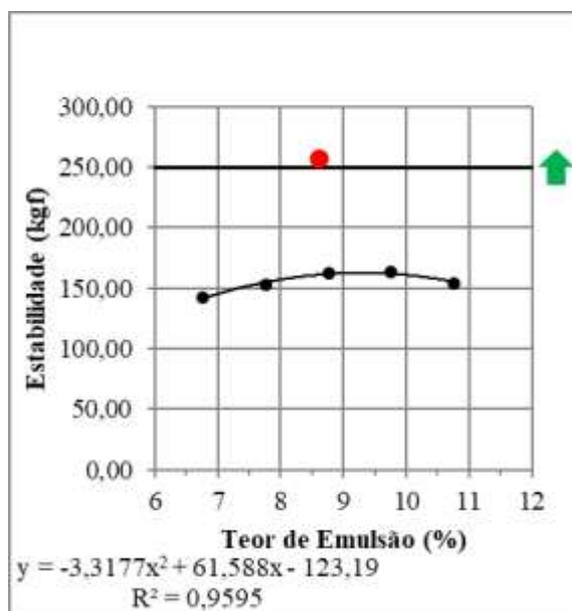
Além disso, vale destacar que em função do volume de vazios obtido (18,47%), a aplicação do PMF é indicada em camadas de *binder* e camadas de revestimento com capa selante, com fluxos de veículos da ordem de $N \leq 10^7$ e $N \leq 2 \cdot 10^6$, respectivamente, conforme indicado no Quadro 1. No entanto, o manual de pavimentação (DNIT, 2006) não diferencia as aplicações do PMF em função do volume de vazios, mas permite a sua utilização em camadas de revestimento para fluxos com $N \leq 5 \cdot 10^6$. De mesmo modo, o PMF pode ser aplicado na execução de serviços de conservação de pavimentos, em especial na realização de operações “tapa buraco” (ABEDA, 2010).

7.2.3 Características mecânicas

Com as características volumétricas determinadas, procedeu-se a execução dos ensaios mecânicos descritos no item 6, onde, além da determinação da estabilidade e fluência dos CPs, foram determinadas a RT o MR do teor de projeto.

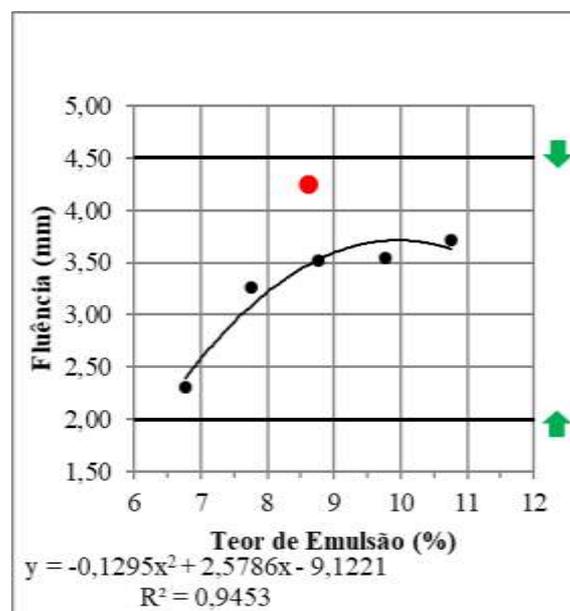
Seguindo a mesma lógica dos parâmetros volumétricos, a Figura 20 e 21 apresenta as médias dos ensaios de estabilidade e fluência juntamente com os resultados dos teores preliminares já apresentados no item 7.1.

Figura 20 – Relação estabilidade com o teor de projeto



(fonte: o próprio autor)

Figura 21 – Relação fluência com o teor de projeto



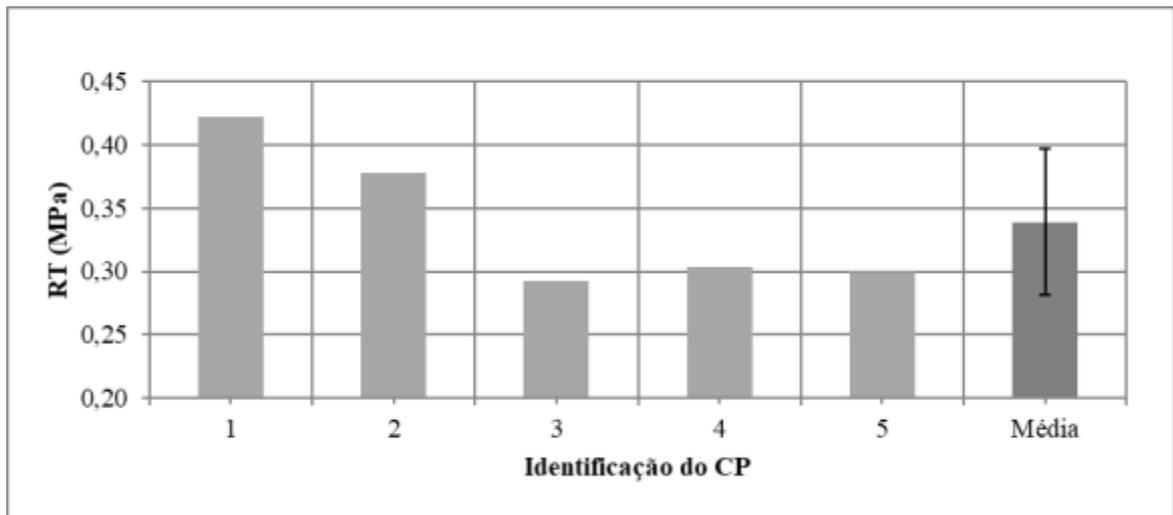
(fonte: o próprio autor)

A partir da Figura 20 e 21 é possível visualizar um considerável aumento da estabilidade e da fluência dos CPs ensaiados no teor de projeto. Este fator pode ter sua variação explicada pelo tipo de ruptura, considerada partir de análise visual como uma ruptura frágil, assim dificultando a leitura do respectivo parâmetro uma vez que a prensa utilizada não consegue determina a curva de estabilidade x fluência. Pesa nesta variação o fato da alteração da prensa utilizada, onde, nos teores de projeto foi utilizada a prensa apresentada na Figura 10 enquanto que para o teor de projeto a prensa identificada através da Figura 11.

Além disso, o volume de vazios de 18,47% obtido na mistura pode estar relacionado com a baixa estabilidade encontrada, que atingiu, em média, 27% da estabilidade, quando comparada com os estudos de David (2006), Ameri e Behnood (2011) e Ferrotti, Pasquini e Canestrari (2014). De acordo com Santana (1993), para estes casos, a estabilidade da mistura será adquirida apenas com o confinamento exercido no processo de pavimentação, o qual não é representado nos ensaios do tipo Marshall.

Ainda, para o teor de projeto, foi determinada a resistência à tração em cinco amostras as quais apresentaram uma variação de resultados entre 0,29 MPa e 0,42 MPa, conforme ilustrado na Figura 22.

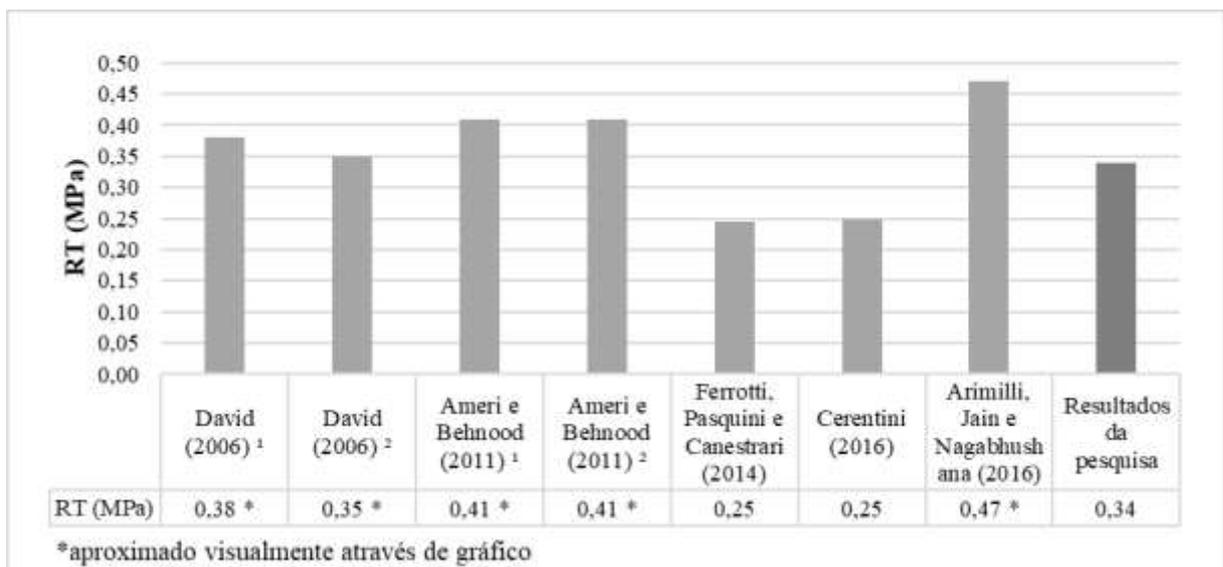
Figura 22 – Resultado do ensaio de RT



(fonte: o próprio autor)

A resistência à tração média obtida para a mistura foi de 0,34 MPa com um desvio padrão de 0,06 MPa, exposto na Figura 22 através da barra de erros. Destaca-se que as normas brasileiras não apresentam valores mínimos para a RT, em se tratando de misturas do tipo PMF. Desta forma, a Figura 23 traz um comparativo da RT obtida nesta pesquisa com as apresentadas nos estudos relacionados, explicitados no item 5 através da Tabela 1.

Figura 23 – Comparativo de resultados de RT



(fonte: o próprio autor)

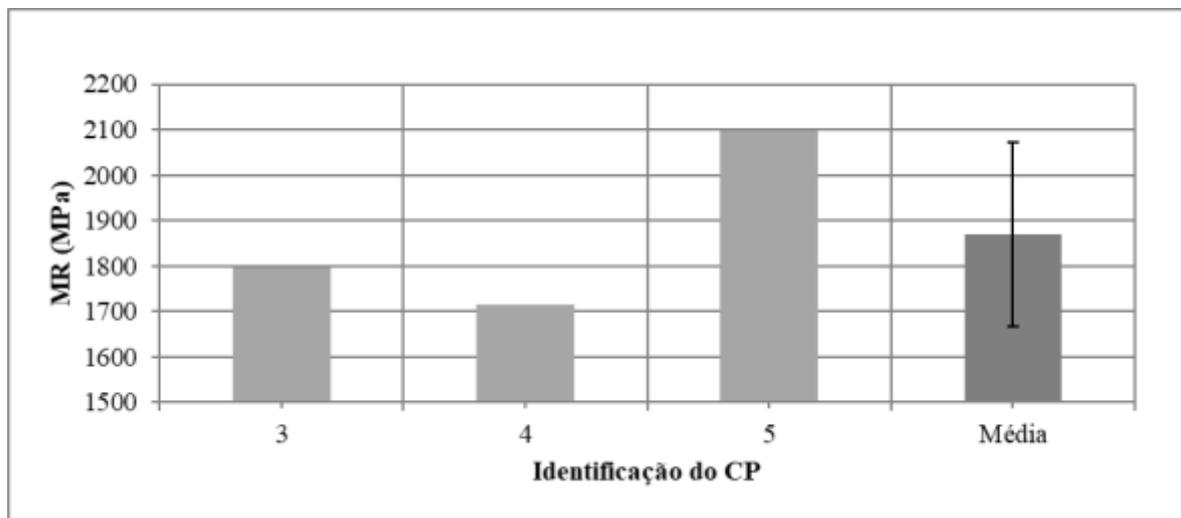
Com base na Figura 23, pode-se observar uma linearidade dos resultados de RT obtidos nos estudos relacionados com esta presente pesquisa. O trabalho de Arimilli, Jain e Nagabhushana

(2016) conseguiu obter resultados de RT superiores em cerca de 39% neste projeto. Enquanto que os valores obtidos em Ferrotti, Pasquini e Canestrari (2014) ficaram aproximadamente 28% inferiores a presente pesquisa.

Também, vale ressaltar que o DNIT não possui um valor de resistência à tração referência para misturas do tipo PMF, mas podem ser citados os valores de 0,65 MPa para concreto asfáltico conforme a norma DNIT 031/2006 – ES e o valor de 0,25 MPa para reciclagem de pavimento a frio com adição de espuma de asfalto indicado na norma DNIT 166/2013-ES. Na presente pesquisa, assim como nos estudos relacionados (DAVID, 2006; AMERI; BEHNOOD, 2011; FERROTTI; PASQUINI; CANESTRARI, 2014; CERENTINI, 2016; ARIMILLI; JAIN; NAGABHUSHANA, 2016), obteve-se uma RT dentro deste intervalo.

Por fim, foi realizada a determinação do MR em três amostras do PMF, com seus resultados expostos na Figura 24, e apresentando uma variação dos valores obtidos entre 1714 MPa e 2098 MPa.

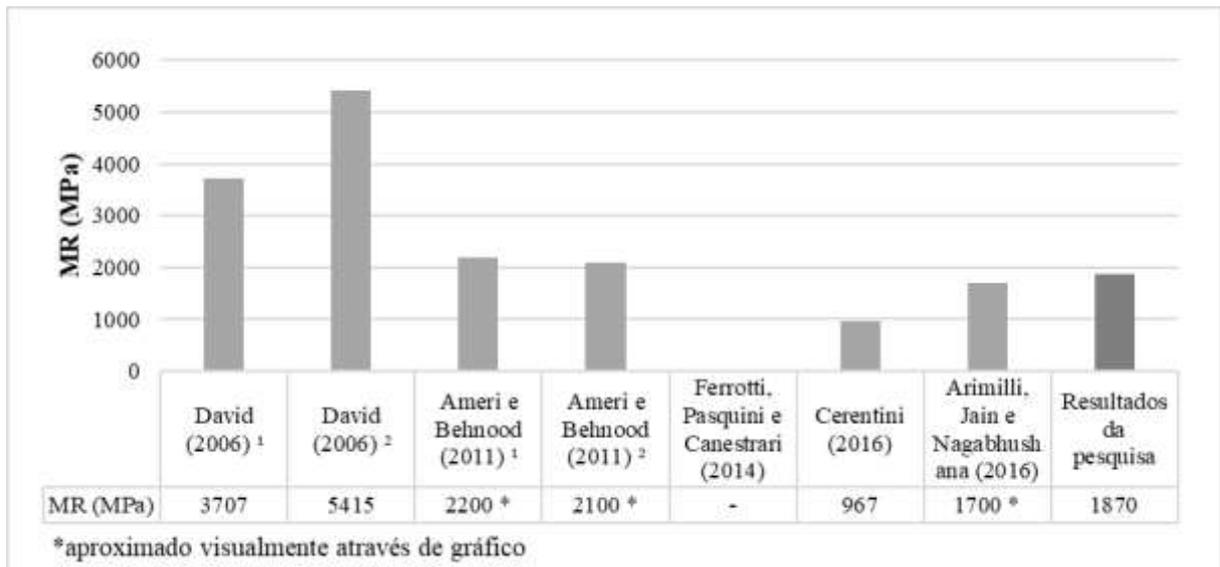
Figura 24 – Resultado do ensaio de MR



(fonte: o próprio autor)

A mistura apresentou um módulo de resiliência médio de 1870 MPa com um desvio padrão de 202 MPa, representados na Figura 24 pela barra de erros. De maneira análoga aos resultados RT, a Figura 25 apresenta um comparativo dos valores de MR.

Figura 25 – Comparativo de resultados de MR



(fonte: o próprio autor)

Com base na Figura 25, é possível verificar uma certa padronização dos resultados, salientando uma discrepância nos valores obtidos por David (2006), que se apresentaram cerca de 98%, para a mistura 1 e em torno de 190%, para a mistura 2, acima dos encontrados nesta pesquisa. Ainda, pode-se evidenciar que os resultados obtidos em Cerentini (2016) apresentam uma diferença de, aproximadamente 48% abaixo dos resultados auferidos neste projeto.

Destaca-se que os valores de módulo de resiliência dependem da estrutura do pavimento planejada para a sua utilização. Onde a rigidez, a qual está associada ao módulo de resiliência, das diversas camadas constituintes do pavimento devem estar compatibilizadas, assim como as suas resistências (DAVID, 2006).

Além disso, conforme Bernucci *et al.* (2008), bons projetos de pavimento combinam materiais e suas espessuras com a rigidez das suas camadas constituintes, propiciando uma estrutura apropriada ao tráfego existente. Esta compatibilização definirá a vida útil do pavimento.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste presente trabalho, foram analisadas as características volumétricas e mecânicas do PMF produzido a partir de material reciclado oriundo da rodovia BR-290/RS, com o objetivo de verificar a possibilidade de sua utilização em camadas de pavimento de rodovias de baixo fluxo. Ainda, foram utilizados emulsão asfáltica convencional do tipo RL-1C e agregado basáltico de mesma origem do agregado fresado para realizar a correção granulométrica do PMF, de modo a obter o enquadramento da granulometria ao centro da faixa D da norma DNIT 153/2010 – ES para Pré- misturado a frio com emulsão catiônica convencional.

A caracterização do material fresado foi realizada a partir da coleta de 20 amostras de agregado reciclado gerados a partir de serviços de manutenção do pavimento da rodovia BR-290/RS e coletadas no período de setembro e outubro de 2017. Estas amostras, passaram por um processo de caracterização visando a análise da homogeneidade dos materiais gerados, uma vez que caso não houvesse padronização destes resultados, este projeto não poderia definir uma granulometria média para o fresado retirado desta rodovia.

Os resultados obtidos demonstraram que, em virtude do volume de vazios existente na mistura (18,47%), a aplicação deste material se destina a camadas de *binder* e camadas de revestimento, desde que com uma capa selante para o segundo caso, obedecendo aos fluxos indicados por Santana (1993), DE $N \leq 10^7$ e $N \leq 2 \cdot 10^6$, respectivamente. Também, de maneira a minimizar a deterioração de pavimentos, é viável a utilização do PMF na realização de serviços de conservação do pavimento (ABEDA, 2010).

Com relação à estabilidade encontrada, tem-se um fator preocupante para garantir a qualidade da aplicação do PMF, pois, apesar de no teor de projeto os resultados terem atendido ao mínimo exigido (0,25 kN, de acordo com a norma DNIT 153/2010 – ES), os valores atingiram, em média, apenas 27% dos resultados encontrados nas pesquisas de David (2006), Ameri e Behnood (2011) e Ferrotti, Pasquini e Canestrari (2014). Tais resultados vão ao encontro do que é ressaltado por Santana (1993), na relação da estabilidade com o volume de vazios.

Os parâmetros de resistência à tração e módulo de resiliência encontrados neste trabalho foram considerados aceitáveis para o objetivo proposto, uma vez que as normas brasileiras não

propõem valores para a utilização do PMF, e que os resultados apresentaram características semelhantes às pesquisas de Ameri e Behnood (2011), Cerentini (2016), Arimilli, Jain e Nagabhushana (2016) para os casos de resistência à tração e módulo de resiliência, e Ferrotti, Pasquini e Canestrari (2014), para o caso de resistência à tração. Entretanto, cabe salientar que o módulo de resiliência da mistura 2 desenvolvida em pesquisa de David (2006) apresentou, um valor 190% maior do encontrado neste projeto e 211% acima da média dos estudos citados anteriormente.

Sugere-se o estudo da aplicação deste projeto, utilizando-se um maior percentual de agregado miúdos, o que acarretaria em uma granulometria adequada para a obtenção de um PMF de graduação densa. Este fator, poderia reduzir o volume de vazios deixando a mistura mais resistente à permeabilidade da água, assim possibilitando a utilização da mistura na faixa de rolamento de rodovias. Também, é uma possibilidade, a execução de estudos de permeabilidade com o intuito de verificar a possibilidade da utilização da mistura produzida como uma camada drenante do pavimento.

Além disso, estudos com softwares de dimensionamento de pavimentos através de modelos mecanísticos-empíricos podem dar uma grande contribuição para a utilização deste tipo de material em rodovias de baixo fluxo, seja como camada de revestimento, ou como camada de *binder*.

Por fim, a aplicação deste PMF em trechos experimentais com a execução de ensaios de campo, poderiam apresentar uma comparação dos resultados obtidos nesta pesquisa com os executados em campo. Desta forma, propiciaria a determinação de fatores campo-laboratório, afim de obter correlações entre os parâmetros obtidos por meio de ensaios laboratoriais com os obtidos através da monitoração de trechos experimentais em campo.

REFERÊNCIAS

ABEDA – ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual básico de emulsões asfálticas**. Rio de Janeiro: Petrobrás, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2001 (reimpr 2010).

AMERI, M.; BEHNOOD, A. Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 26, n. 1, p.475-480, jan. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811003102>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

ARIMILLI, S.; JAIN, P. K.; NAGABHUSHANA, M. N. Optimization of Recycled Asphalt Pavement in Cold Emulsified Mixtures by Mechanistic Characterization. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 28, n. 2, p.04015132-1-04015132-10, fev. 2016. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001412](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001412)>. Acesso em: 14 nov. 2017.

ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14376**. Emulsões asfálticas – Determinação do resíduo asfáltico por evaporação – Método expedito. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14393**. Emulsões asfálticas – Determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14491**. Emulsões asfálticas – Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15573**. Misturas asfálticas – Determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15619**. Misturas asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6300**. Emulsões asfálticas catiônicas – Determinação da resistência à água (adesividade) em agregados graúdos. Rio de Janeiro, 2009.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica – materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros**. 1ª ed. (3ª reimpr.) Rio de Janeiro: Petrobrás, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2008 (reimpr. 2010).

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3ª ed. São Paulo: Exceção, 2016 (reimpr. 2010).

CARNEIRO, F.L. **Um novo método para determinação da resistência à tração dos concretos**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 1943.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Petrobrás, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2015.

CERENTINI, N. P. **Dosagem de um pré-misturado a frio utilizando material asfáltico fresado**. 2016. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (em Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2016.

CNT – CONSELHO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial**. Brasília: CNT, SEST SENAT, 2017.

D'ANGELO, J. D.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. **Warm-mix asphalt: european practice**. International Technology Scanning Program. Virginia: Federal Highway Administration, 2008.

DAVID, D. **Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado**. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/98**. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 053/94**. Misturas Betuminosas – percentagem de betume. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 054/97**. Equivalente de Areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 083/98**. Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 086/94**. Agregados – determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 089/94**. Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 107/94**. Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 196/98**. Agregados – determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006 – ES**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico -Especificação de serviço – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135/2010 – ME**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136/2010 – ME**. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 153/2010 – ES**. Pavimentação asfáltica - Pré- misturado a frio com emulsão catiônica convencional – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 166/2013 – ES**. Pavimentação asfáltica - Reciclagem de pavimento a frio “in situ” com adição de espuma de asfalto – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pesquisas em Andamento**: Novo Método de Dimensionamento Mecanístico Empírico de Pavimentos Asfálticos. Convênio UFRJ / DNIT. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/pesquisa/pesquisas-em-andamento>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

FERROTTI, G.; PASQUINI, E.; CANESTRARI, F. Experimental characterization of high-performance fiber-reinforced cold mix asphalt mixtures. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 57, p.117-125, abr. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181400124X>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments**. FHWA-SA-98-042. Washington, 1997.

LIAO, M.; LUO, C.; WANG, T.; XIE, X. Developing Effective Test Methods for Evaluating Cold-Mix Asphalt Patching Materials. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 28, n. 10, p.04016108-1-04016108-10, out. 2016. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001639](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001639)>. Acesso em: 14 nov. 2017.

MEDINA, J; MOTTA, L. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: [s. n],2005.

MOTTA, R. dos S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e consumo energético**. 2011. 229 f.

Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SANTANA, H. **Manual de pré-misturados a frio**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, 1993.

TANSKI, M. C. **Comportamento mecânico de material reciclado a frio com emulsão e cimento**. 2016. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.