



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



JOSELLE FERRAZ CERDEIRA

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE CONTENDO
100% DE MATERIAL FRESADO PARA EXECUÇÃO DE TAPA-BURACOS**

**Belo Horizonte
2018**

Joselle Ferraz Cerdeira

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE CONTENDO
100% DE MATERIAL FRESADO PARA EXECUÇÃO DE TAPA-BURACOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Linha de Pesquisa: Reciclagem

Orientador: Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula

Belo Horizonte

2018

Cerdeira, Joselle Ferraz.
C413e Estudo de misturas asfálticas recicladas a quente contendo 100%
de material fresado para execução de tapa-buracos / Joselle Ferraz
Cerdeira. - 2018.
131 f. : il.
Orientador: Flávio Renato de Góes Padula.

Dissertação (mestrado) - Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.
Bibliografia.

1. Asfalto - Reciclagem. 2. Concreto asfáltico. 3. Fresagem. 4.
Pavimentos - Manutenção e reparos. I. Padula, Flávio Renato de
Góes. II. Título.

CDD: 620.196



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A
QUENTE CONTENDO 100% DE MATERIAL FRESADO
PARA EXECUÇÃO DE TAPA-BURACOS”

Autora: Joselle Ferraz Cerdeira

Orientador: Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Cláudio José Martins
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Belo Horizonte, 11 de Julho de 2018.

DEDICATÓRIAS

Esse trabalho é dedicado à Jesus Cristo Senhor da minha vida. A meus pais, às minhas filhas Ana Luiza e Clara, a meu sobrinho Gabriel, aos meus irmãos e a meu querido marido Epaminondas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que renova às minhas forças e me encheu da sua graça nessa missão.

Aos meus pais pelo dom da vida e pela base em fazer a melhor escolha.
Às minhas filhas Ana Luiza e Clara e ao Gabriel, por aceitarem de coração aberto, dividir o tempo que seria deles com a pesquisa.

À meu marido Epaminondas que me ajudou sempre e principalmente quando eu mais precisei...parceiro...amor e meu porto seguro.

À dindinha Glaucia que me rendeu tantas vezes junto com as queridas primas nos dias mais apertados com tanto carinho e disposição.

Aos meus amigos que fazem parte de minha caminhada, sempre perto mesmo quando eu estive longe.

Ao professor Augusto Bezerra que me incentivou a fazer parte desse programa.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica principalmente ao DET – Departamento de Engenharia de Transporte do CEFET/MG que disponibilizou o Laboratório de Tecnologia dos Pavimentos e Ferrovias e o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais.

Ao professor Mateus Justino que fomentou em mim o prazer da pesquisa em laboratório.

Ao laboratório de Asfalto da UFOP e em especial ao Hebert e Edgar que disponibilizaram conhecimento e gentileza na realização do ensaio de Módulo de Resiliência.

Ao meu professor orientador Flávio Renato de Góes Padula que acredita na engenharia com sustentabilidade e acreditou que eu poderia fazer parte desse grupo de pesquisa e pela boa condução dessa pesquisa.

Aos membros da banca em aceitar o convite para avaliarem esse trabalho.

Aos profissionais e amigos que contribuíram na realização dessa pesquisa, em especial ao Richard Barreto e Felício Geraldo Oliveira.

Às empresas AB Nascentes das Gerais e NTA Asfaltos pelos materiais e conhecimento técnico cedido, em particular aos engenheiros Gerson da Silva Pereira e Vanise Maria Santos.

“...não importa qual seja o poder de Deus, o primeiro aspecto de Deus jamais é o Senhor absoluto, do Todo-Poderoso. É o do Deus que se coloca no nosso nível humano e se limita.”

Jacques Ellul

RESUMO

Os materiais que compõem o pavimento asfáltico podem ser 100% recicláveis. A reciclagem a quente de Concreto Asfáltico Fresado (CAF) tem potencial em reduzir os impactos ambientais e sobretudo os custos de construção dos pavimentos asfálticos. O presente trabalho propõe um estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas usando 100% de CAF com acréscimo de agente rejuvenescedor – AR e Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP, além dos produtos melhoradores de mistura asfáltica como o aditivo surfactante – Evotherm e pó de borracha fino como agregado. O CAF foi caracterizado fisicamente, sendo suas composições granulométricas enquadradas na camada de rolamento, faixa “C”, do DNIT. As dosagens se basearam em metodologias racionais (mecanística) como a metodologia Marshall e a metodologia proposta por Castro Neto, onde foram determinados os teores de ligantes totais em função da resposta dos resultados de caracterização mecânica utilizando os ensaios de Estabilidade e Fluência Marshall, de Resistência à Tração por Compressão Diametral, ensaio de desgaste Cântabro e do levantamento do Módulo de Resiliência. A Estabilidade Marshall apresentou valores entre 1.032 a 2.948 kgf e os ensaios de Resistência a Tração por Compressão Diametral apresentaram valores entre 0,68 e 2,89 MPa. Os resultados mecânicos do módulo resiliência para as misturas selecionadas apresentaram valores entre 11.803 a 18.288 MPa. Essa pesquisa mostrou que é possível se obter uma mistura asfáltica, a partir de 100% de CAF reciclado a quente, dentro das exigências normativas do DNIT, para execução de tapa-buracos, com ênfase à utilização de mini usinas móveis.

Palavras-chave: Reciclagem a quente; Concreto Asfáltico Fresado; Rejuvenescedor; Tapa-buracos.

ABSTRACT

The materials that make up the asphalt pavement are 100% recyclable. Hot recycling of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) has the potential to reduce the environmental impacts and costs of construction. The present work proposes a study of the mechanical behavior of recycled asphalt mixtures using 100% RAP with the addition of rejuvenator agent - AR and asphaltic concrete pavement (ACP), besides the improved products of asphalt mixture as the surfactant additive – Evotherm and the rubber crumb as fine aggregate. The RAP was physically characterized, with its grain size compositions framed in the rolling layer, gradation “C” DNIT’s Standards. The dosages were based on rational (mechanistic) methodologies such as the Marshall methodology and the methodology proposed by Castro Neto, where the total binder contents were determined, considering the recovered binder and later performed the mechanical characterization using the Marshall Stability, Tensile Strength, Cantabrian test and Resilient Modulus. The Marshall Stability presented values between 1,032 and 2,948 kgf and the Tensile Strength for diametral compression test showed values between 0.68 and 2.89 MPa. The results for modulus of resilience for the blends are the following values between 11,803 to 18,288 MPa. This research has showed that it is possible to get an asphalt mix, from 100% RAP hot mix recycling, within the DNIT's normative requirements, for the execution of Pothole Repair, with emphasis on the use of mobile mini asphalt plants.

.

Keywords: Hot recycling; Concrete Asphalt Milling; Rejuvenator; Pothole Repair.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVO GERAL	19
2.1	Objetivos Específicos	19
3	JUSTIFICATIVA	20
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
4.1	Pavimentos asfálticos	22
4.2	Misturas Asfálticas	26
4.2.1	Misturas Asfálticas a Quente	28
4.2.2	Misturas modificadas com agregado-borracha	29
4.2.3	Misturas modificadas com aditivo surfactante	30
4.3	Reciclagem do cimento asfáltico fresado (CAF)	31
4.4	Dosagens das misturas asfálticas	34
4.5	Módulo de Resiliência	36
4.6	Agentes Rejuvenescedores	38
4.7	Operações de tapa buracos	40
4.8	Usinas para reciclagem a quente de CAF	47
5	MATERIAIS E MÉTODOS	52
5.1	Materiais	53
5.1.1	Fresado – CAF (Cimento Asfáltico Fresado)	53
5.1.2	CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo	54
5.1.3	Pó de Borracha	55
5.1.4	Aditivo surfactante	56
5.1.5	Agente Rejuvenescedor	57
5.2	Metodologia	59
5.2.1	Caracterização dos materiais componentes do CAF	59
5.2.2	Dosagens dos corpos de provas	68
5.2.3	Determinação das propriedades volumétricas	73
5.2.4	Caracterização mecânica das misturas asfálticas recicladas	74
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
6.1	Caracterização dos materiais do CAF	85
6.1.1	Ensaio Extração de Betume	85
6.1.2	Ensaio de granulometria do CAF sem ligante	85
6.1.3	Determinação da densidade aparente (G_{sb}), densidade real (G_{sa}) e absorção dos agregados	87

6.2	Propriedades Volumétricas da Mistura	88
6.3	Ensaio nos corpos de prova – caracterização mecânica	95
6.3.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral	95
6.3.3	Estabilidade e Fluência Marshall	101
6.3.4	Ensaio Abrasão – Cântabro	107
6.3.4.1	Resumo dos ensaios mecânicos realizados	113
6.3.5	Módulo de Resiliência.	114
7	<i>CONCLUSÕES</i>	119
8	<i>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</i>	123
	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção típica das camadas dos pavimentos asfálticos	23
Figura 2 - Cargas aplicadas em um pavimento	24
Figura 3 - Ilustração da trinca interligada - tipo jacaré.....	26
Figura 4 - Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de usinagem.....	28
Figura 5 - Fotografia da máquina fresadora	32
Figura 6 - Imagem do rolo de corte de uma fresadora	32
Figura 7 - Processo de difusão do rejuvenescedor	40
Figura 8 - Delimitação e corte da área geométrica.....	43
Figura 9 - Deposição do CBUQ e compactação.....	44
Figura 10 - Aplicação da pintura de ligação	44
Figura 11 - Técnica <i>Throw-and-roll</i>	45
Figura 12 - Técnica Injeção por spray	46
Figura 13 - Equipamento para transporte e armazenamento materiais	47
Figura 14 - Fases de operação de uma mini usina recicladora	49
Figura 15 - Usina do tipo <i>drum mixer</i> com entrada central para o CAF	50
Figura 16 - Fluxograma da pesquisa experimental	52
Figura 17 - Foto dos locais de recolhimento do CAF - km 77+800 e 93+000	53
Figura 18 - Foto da amostragem do fresado in natura.	54
Figura 19 - Pó de borracha utilizado na pesquisa	56
Figura 20 - Aditivo surfactante – Evotherm P25 utilizado na pesquisa.....	57
Figura 21 - Agente rejuvenescedor utilizado na pesquisa.....	57
Figura 22 - Equipamento extrator de betume tipo Rotarex.....	60
Figura 23 - Amostra do CAF após a extração do betume	63
Figura 24 - Etapas do ensaio Gmm.....	68
Figura 25 - Etapas e equipamentos da moldagem dos CPs	72
Figura 26 - Corpos de prova recém moldados	73
Figura 27 - Foto do equipamento utilizado para o ensaio RT.....	76
Figura 28 - Foto do equipamento Prensa Marshall	77
Figura 29 - Foto do equipamento de Abrasão Los Angeles	79
Figura 30 - Foto do equipamento utilizado para o ensaio MR.....	80
Figura 31 - CPs utilizados no ensaio de MR	81

Figura 32 - Foto do acondicionamento térmico dos CPs a 25°C.....	82
Figura 33 - Foto do posicionamento do CP e do LVDT para o ensaio MR.....	83
Figura 34 - Foto do posicionamento do CP e do LVDT para o ensaio MR.....	84
Figura 35 - Curva granulométrica dos Materiais (A1), (A2) e (A3) – km 78+800.....	86
Figura 36 - Curva granulométrica dos Materiais (B1), (B2) e (B3) – km 93+000.....	86
Figura 37 - Volume do Agregado Mineral (VAM) em função da Estabilidade de cada mistura estudada.....	93
Figura 38 - Volume de vazios em função da adição de aditivo surfactante.....	94
Figura 39 - Resistência à Tração – Misturas M1 a M21	99
Figura 40 - Estabilidade Marshall – Misturas M1 a M21.....	105
Figura 41 - Fluência Marshall – sete composições de dosagens.....	106
Figura 42 - Desgaste Cântabro – Misturas 1 a M21.....	111
Figura 43 - Desgaste Cântabro – Mistura M1.....	112
Figura 44 - Desgaste Cântabro – Mistura M2.....	112
Figura 45 - Resultados obtidos para Relação Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração (RT) das misturas	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração	55
Tabela 2 - Características técnicas do Extrato Rejuvenescedor NPA.....	58
Tabela 3 - Série de peneiras	62
Tabela 4 - Especificações granulométricas - DNIT	64
Tabela 5 - Quantitativos dos corpos de prova moldados para caracterização mecânica das misturas asfálticas recicladas	70
Tabela 6 - Quantitativos dos corpos de prova moldados para caracterização mecânica das misturas asfálticas recicladas - Ensaio de Módulo de Resiliência	81
Tabela 7 - Valores obtidos do ensaio de Extração de betume	85
Tabela 8 - Resultados ensaios Gsb, Gsa e Absorção - km 78+800	87
Tabela 9 - Resultados ensaios Gsb, Gsa e Absorção - km 93+000	88
Tabela 10 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP	89
Tabela 11 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP com adição de aditivo surfactante - 0,5% da mistura.....	89
Tabela 12 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP com adição de AR.....	90
Tabela 13 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP com adição de Borracha e AR	90
Tabela 14 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP com adição de Borracha e AR	91
Tabela 15 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP com adição de Borracha	91
Tabela 16 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP com adição de aditivo surfactante - 0,03% do ligante.....	92
Tabela 17 - Resistência à Tração - Uso do CAP.....	96
Tabela 18 - Resistência à Tração - Uso do CAP com adição de aditivo surfactante (Evotherm).....	96
Tabela 19 - Resistência à Tração - Uso do CAP com adição de agente rejuvenescedor - AR (Extrato NPA)	97
Tabela 20 - Resistência à Tração - Uso do CAP com adição de borracha e agente rejuvenescedor.....	97

Tabela 21 - Resistencia à Tração - Uso do CAP com adição de borracha e rejuvenescedor.....	98
Tabela 22 - Resistencia à Tração - Uso do CAP com adição de borracha	98
Tabela 23 - Resistencia à Tração - Uso do CAP com adição de aditivo surfactante.....	99
Tabela 24 - Resultados para ensaio de Resistência à Tração	100
Tabela 25 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP	101
Tabela 26 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP com acréscimo de aditivo surfactante (Evotherm).....	102
Tabela 27 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP com acréscimo de agente rejuvenescedor - AR (Extrato NPA).....	102
Tabela 28 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP com acréscimo de borracha e agente rejuvenescedor	103
Tabela 29 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP com acréscimo de borracha e rejuvenescedor	103
Tabela 30 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP com acréscimo de borracha e rejuvenescedor	104
Tabela 31 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP com acréscimo de aditivo surfactante.....	104
Tabela 32 - Desgaste Cântabro - Uso do CAP.....	107
Tabela 33 - Desgaste Cântabro - Uso do CAP com acréscimo de aditivo surfactante	108
Tabela 34 - Desgaste Cântabro - Uso do CAP com acréscimo de agente rejuvenescedor - AR (Extrato NPA).....	108
Tabela 35 - Desgaste Cântabro - Uso do CAP com acréscimo de borracha e agente rejuvenescedor.....	109
Tabela 36 - Desgaste Cântabro - Uso do CAP com acréscimo de borracha e rejuvenescedor	109
Tabela 37 - Resistencia à Tração - Uso do CAP com acréscimo de borracha.....	110
Tabela 38 - Desgaste Cântabro - Uso do CAP com acréscimo de aditivo surfactante	110
Tabela 39 - Resultados classificados para os ensaios mecânicos realizados	113
Tabela 40 - Módulo de Resiliência - Resultados dos ensaios - M1, M2 e M8	114
Tabela 41 - Módulo de Resiliência - Resultados dos ensaios - M17 e M20	115
Tabela 42 - Módulo de Resiliência - Resultados representativos.....	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AR	Agente rejuvenescedor
B	Pó de borracha fina
CAF	Concreto Asfáltico Fresado
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBUQ	Concreto Betuminoso usinado a quente
CARQ	Concreto Asfáltico Reciclado a Quente
CP	Corpos de prova
D	Diâmetro do corpo de prova
D	Valor do desgaste (%)
DER/ES	Departamento de Estradas de Rodagem do Espírito Santo
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EUA	Estados Unidos da América
ES	Especificação de serviço
Gmb	Densidade específica aparente da mistura
Gmm	Densidade máxima da mistura não compactada
Gsa	Densidade real do agregado
Gsb	Densidade aparente do agregado
H	Altura do corpo de prova
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MR	Módulo de resiliência
ME	Método de ensaio
NBR	Norma Brasileira Registrada
NE	Nível de esforço
Kgf	Quilograma força
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RBV	Relação Betume vazios
RT	Resistência à tração (MPa)
TER	Terminologia

TSM	Tambor Secador Misturador
VAM	Vazios do agregado mineral
VCB	Vazios Cheios de Betume
Vv	Volume de vazios

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Newtons
%CAP	Percentual de CAP na mistura
E	Módulo de Elasticidade
F	Carga de ruptura ou carga vertical (N)
σ_o	Tensão vertical (compressão)
τ_o	Tensão horizontal (cisalhamento)
V	Velocidade
km	Quilômetro
π	pi
μ	coeficiente de <i>poison</i>
Δ	deformação elástica ou resiliente
δR	Resistência à tração (MPa)

1 INTRODUÇÃO

O crescente número de veículos trafegando pelos sistemas viários das cidades gera sobrecarga nos pavimentos, interferindo diretamente na durabilidade e qualidade das vias. Aliado ao crescimento da população e das condições climáticas, as prefeituras e órgãos gestores das vias e rodovias cada vez mais necessitam de serviços intermitentes de manutenção e recuperação das vias.

Neste contexto de demanda de grandes volumes outros problemas estão incluídos, como a contínua exploração de novas jazidas minerais e a eminente escassez de material para produção de asfalto. O ligante betuminoso, apesar de corresponder a menor parte é o insumo mais caro da mistura asfáltica. Zaumanis et al. (2014b) citam que na última década o preço do asfalto triplicou. Outro fato a ser considerado são as legislações ambientais cada vez mais restritivas quanto às áreas de deposição de material fresado, considerado resíduo de Classe II B, sólido não perigoso (inerte) conforme NBR 10.004/2004.

Portanto, a reciclagem vem ganhando ênfase como opção para reabilitação de pavimentos asfálticos por todo o mundo, pois é a opção que concilia as exigências técnicas, ambientais e sociais, e ainda possibilita a economia de energia e de materiais na produção.

Segundo Zaumanis et al. (2014b) a reciclagem integral dos materiais removidos dos revestimentos asfálticos de pavimentos existentes resultaria na economia de 50 a 70% na aquisição de novos materiais. Além disto, reduziria as emissões de CO₂ em 35% em relação a misturas virgens.

Estes fatores levaram à escolha de alternativas viáveis para a recuperação e reparo das vias degradadas, sendo a reciclagem a quente do pavimento considerada uma das principais técnicas de recuperação e manutenção das vias urbanas ou rurais.

A técnica de tapa-buracos consiste na execução de uma nova camada asfáltica sobre a estrutura já existente, aumentando significativamente a vida útil do pavimento. Essa

técnica permite utilizar a mistura reciclada a quente na execução da nova capa de revestimento asfáltico com as mesmas exigências técnicas e normativas que para a construção convencional.

O estudo de viabilidade técnica e econômica (HEGGIE, 1988) concluiu que a falta de manutenção das vias públicas e privadas deficientes geram despesas adicionais aos próprios usuários por meio de aumento de custos de operação e manutenção dos veículos e diminuição da atividade econômica.

A reciclagem a quente de Concreto Asfáltico Fresado (CAF), em países mais desenvolvidos, tem sido realizada com o reaproveitamento do material para capa de rolamento de pavimentos asfálticos. Essa técnica usa uma porcentagem, entre 20 e 50% de CAF, e o restante de materiais virgens, para a obtenção de um material de engenharia adequado para uso como revestimento asfáltico. Tal tecnologia demanda o uso de usinas asfálticas adequadas para a produção desse material, as quais ainda não estão disponíveis no mercado brasileiro. Mini usinas adequadas para a reciclagem a quente de CAF podem ser construídas de forma simples e econômica, o que poderia possibilitar a execução de serviços que demandem pequenas quantidades de material, como por exemplo serviços de tapa-buracos. Assim, para a realidade brasileira, acredita-se que a reciclagem a quente de CAF pode ser inicialmente viabilizada.

Nesses termos esse trabalho propõe avaliar o uso de 100% do CAF reciclado a quente nos serviços de tapa-buracos, verificando a necessidade de correção da granulometria e adição de agentes rejuvenescedores com menor custo possível, analisando também a indicação de mini usinas nessa aplicabilidade. Adicionalmente será estudado as misturas recicladas com produtos complementares: como o aditivo surfactante (Evotherm) e o pó de borracha na composição da mistura.

2 OBJETIVO GERAL

Avaliar o uso de Concreto Asfáltico Reciclado a Quente (CARQ), com emprego de 100% Concreto Asfáltico Fresado (CAF), considerando adição de agentes rejuvenescedores e produtos melhoradores da reologia/resistência mecânica de mistura para aplicação em serviços de reparo do revestimento asfáltico (tapa-buracos).

2.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos buscam -se:

- a) Caracterizar o material fresado, conhecendo o percentual de ligante remanescente e a granulometria resultante do processo de fresagem.
- b) Verificar se esse concreto asfáltico fresado (CAF) pode, com o acréscimo de ligante novo e ou agentes rejuvenescedores, ser reprocessado tornando-se um CARQ de qualidade atendendo às normativas técnicas de um CAUQ convencional.
- c) Verificar as propriedades físicas dos agregados remanescentes e as propriedades mecânicas da remistura a quente desse CAF através de moldagem de corpos de prova e experimentação preferencialmente sem acréscimo de agregados novos, ou seja, ao teor de 100% CAF, em serviços de tapa-buracos.
- d) Avaliar a mistura reciclada com adição de 0,5 e 1,0 % de asfalto virgem.
- e) Avaliar a adição de agentes rejuvenescedores na mistura reciclada com 100 % de CAF a dose de 0,5 e 1,0% do teor da mistura.
- f) Avaliar a adição do pó de borracha por via seca na mistura reciclada e a influência desse produto no desempenho mecânico da mistura reciclada.
- g) Avaliar a contribuição da adição do aditivo surfactante – Evotherm nas propriedades mecânicas da mistura reciclada, principalmente a trabalhabilidade.
- h) Estudar a viabilidade técnica do uso de CARQ em operações de conservação e manutenção das vias como tapa-buracos.

3 JUSTIFICATIVA

O processo de reciclagem de misturas asfálticas tem grande potencial de contribuição tecnológica para a sustentabilidade e economicidade de obras viárias. Obras estas de interesse público que são de fundamental importância para o desenvolvimento do país e geralmente responsáveis por consideráveis impactos ambientais. O cimento asfáltico fresado - CAF é obtido a partir da fresagem do revestimento asfáltico após o término de sua vida útil em serviço. Esse material é gerado quando a camada asfáltica do pavimento é removida para fins de reconstrução, recapeamento, ou para obter acesso às instalações enterradas. Desta forma, a geração de CAF é constante e volumosa contribuindo para acúmulo de resíduo sólidos. O CAF é um material de alta qualidade constituído por agregados revestidos por Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) envelhecido.

Segundo Zaumanis et al. (2014b) o uso de CAF em misturas asfálticas é técnica, econômica e ecologicamente viável. Comumente o CAF é adicionado em 10 a 30%. O uso de 100% de material fresado em reciclagens a quente facilita e diminui custos de aquisição do asfalto novo, além de trazer significativo ganho ambiental.

Lima (2003) acrescenta que a reciclagem integral dos materiais removidos dos revestimentos asfálticos de pavimentos existentes resultaria em diversas economias nos investimentos de infraestrutura viária como de materiais na produção desses materiais uma vez que evita a exploração agressiva das áreas de jazidas.

Conforme citado por Lima (2003) outra vantagem do uso da reciclagem de pavimentos está relacionada à economia de energia de produção em relação às tradicionais técnicas de construção de pavimentos.

Segundo Zaumanis et al. (2014b) o uso de 100% do CAF à quente, fecha o ciclo de vida do pavimento por meio da plena utilização dos materiais nobres encontrados no asfalto recuperado e que apresenta alta qualidade de aplicações. Reciclagem de asfalto não é verdadeiramente sustentável quando é utilizada fora deste contexto.

Diante disso as misturas asfálticas recicladas a quente com uso de 100% CAF vêm ganhando destaque junto aos pesquisadores, órgãos gestores e profissionais da área. (AGUILAR, 2016; ALMEIDA, 2016; SILVA, 2011; ZAUMANIS et al., 2014a; ZAUMANIS et al., 2018).

Trichês (2011) menciona que na Alemanha, a técnica de reciclagem do pavimento tornou-se obrigatória para atendimento às normas governamentais que visam evitar e reduzir a exploração de novos materiais e que incentivam a reutilização de rejeitos ou aproveitamento dos materiais existentes.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Pavimentos asfálticos

“O pavimento de uma rodovia é uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentados sobre infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada como subleito” (DNIT-IPR-719, 2006).

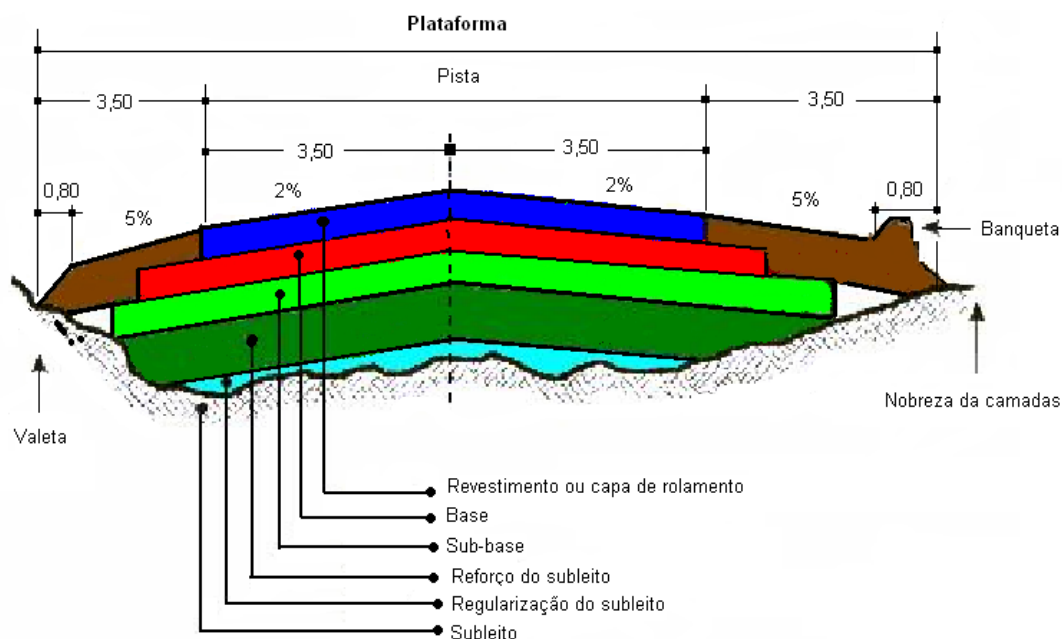
O pavimento rodoviário classifica-se basicamente em dois tipos: rígidos e flexíveis, classificados segundo os materiais utilizados e o seu comportamento mecânico. Sendo os flexíveis aqueles constituídos normalmente de revestimento betuminoso sobre camadas essencialmente granulares.

Santana (1993) apud Fortes (2015) complementa que pavimento é uma estrutura construída após finalizados os serviços de terraplanagem com a função principal de fornecer ao usuário segurança e conforto, sob o ponto de vista da engenharia, isto é, com a máxima qualidade e o mínimo custo.

“Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos.” (BERNUCCI et al., 2010).

A figura 1 mostra um esquema construtivo onde são representadas as camadas que geralmente constituem os pavimentos flexíveis: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. A camada de regularização do subleito é realizada nos serviços de terraplenagem. A camada de revestimento, também chamada de capa de rolamento, é parte mais superficial do pavimento, variando sua espessura de acordo com o dimensionamento, ou seja, dependendo do carregamento e do volume de tráfego que estará sujeita.

Figura 1 - Seção típica das camadas dos pavimentos asfálticos



Fonte: Marques (2009)

Segundo Santos (2010) as camadas que constituem um pavimento flexível distinguem-se pelas funções que desempenham, podendo estabelecer-se dois importantes grupos: a parte superficial e o corpo de pavimento, sendo a parte superficial (de rolamento dos veículos) a camada que sofre desgaste e que por sua vez contribui para a durabilidade do pavimento por meio da impermeabilização do corpo estradal.

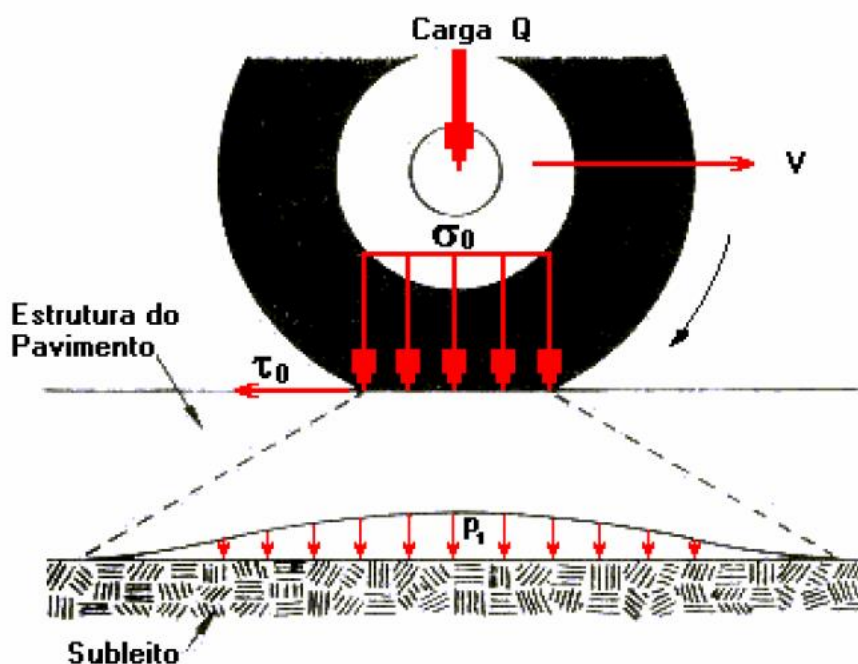
Segundo a ABNT NBR-7207/82, o pavimento é uma estrutura construída após terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto, a:

- Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- Resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

Desta forma, a solicitação do pavimento acontece por uma carga de veículo Q , que se desloca sobre o revestimento com uma velocidade V , ficando sujeito a uma tensão normal na direção vertical σ_0 (de compressão) e uma tensão cisalhante na direção horizontal τ_0 (de cisalhamento), como indicado na Figura 2. Confirmado por Santana

(1993) apud Marques (2009) que as várias camadas componentes da estrutura do pavimento possuem a função de dissipar a tensão vertical aplicada na superfície para que o subleito receba uma parcela mínima desta tensão vertical (P_1). A tensão horizontal (τ_0) aplicada na superfície exige que o revestimento possua uma coesão mínima para suportar a parcela do esforço de cisalhamento.

Figura 2 - Cargas aplicadas em um pavimento



Fonte: Santana (1993) apud MARQUES (2009)

Bernucci et al. (2010) reforça que o revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento. [...] pode ainda apresentar trincamento por envelhecimento do ligante asfáltico, ação climática etc.

A composição: ligante asfáltico e agregados é responsável pelo comportamento mecânico do pavimento (SANTOS, 2010). Em alguns casos os revestimentos asfálticos podem conter produtos complementares associados.

Para Nascimento (2011) os agregados são responsáveis pela resistência mecânica e química das misturas asfálticas. Portanto, para serem utilizados em pavimentação devem apresentar características tais como:

- Resistência ao choque, (tenacidade):
- Resistência ao desgaste (dureza), capacidade de resistir ao desgaste causado pelos veículos;
- Resistência à compressão, para suportar o peso dos veículos e transmitir os esforços para as camadas inferiores do pavimento;
- Resistência química (sanidade), baixo coeficiente de expansão na presença de argilominerais expansivos ou por ação de calor, para resistir às ações do clima; e - Adesividade ao ligante asfáltico, características físico-químicas que garantem adesão ao betume.

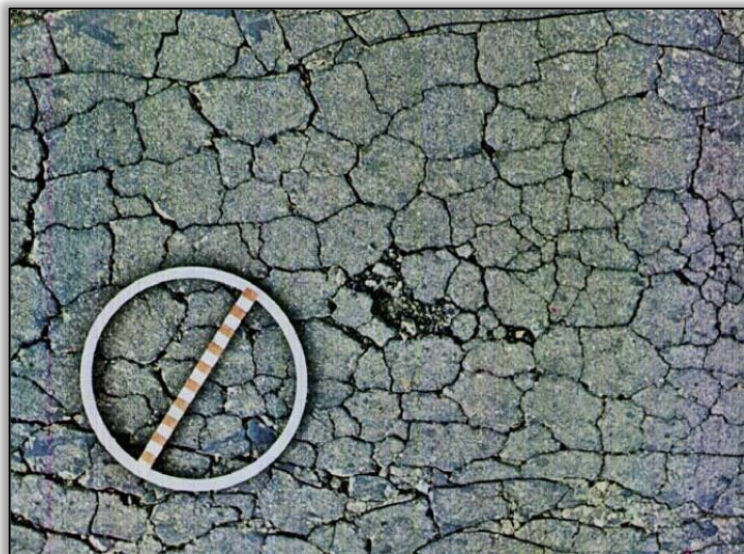
Os agregados remanescentes do material fresado, são considerados de alta qualidade pois já foram submetidos a controle tecnológico e laboratorial para o processo de execução do pavimento original.

“O revestimento asfáltico na composição de pavimentos flexíveis é uma das soluções mais tradicionais e utilizadas na construção e recuperação de vias urbanas, vicinais e de rodovias.” (NAKAMURA ,2011).

"A maioria das patologias envolvendo pavimentos tem caráter evolutivo. Uma simples fissura, por exemplo, se não eliminada em tempo, pode evoluir para trinca e daí, sob a ação do tráfego e intempéries, se transformar em uma panela” (CICHINELLI, 2014).

O envelhecimento dos ligantes asfálticos leva ao endurecimento da camada de revestimento, resultando em aumento de sua viscosidade com consequente modificação de suas propriedades físicas, químicas e reológicas, resultando em aumento de rigidez e facilitando o aparecimento de fissuras e trincas. As trincas são fendas existentes no revestimento, facilmente visíveis, como pode ser visto na figura 3, trincas interligadas sem direções preferenciais, tipo jacaré.

Figura 3 - Ilustração da trinca interligada - tipo jacaré



Fonte: DNIT- 005/2003 -TER

Entre os defeitos do pavimento, esta pesquisa destaca o problema dos buracos nas vias, definidos como panelas, pois tal defeito afeta diretamente o tráfego nas áreas urbanas ou rurais, seja por diminuir a velocidade operacional ou mesmo por provocar acidentes. Essa situação influencia a segurança e conforto dos usuários das vias e rodovias. Cichinelli (2014) salienta que operações "tapa-buracos" são recomendadas exclusivamente para correções pontuais e quando a base e a sub-base ainda não estão comprometidas.

Segundo a norma DNIT 005/2003-TER, o termo panela se refere à cavidade que se forma no revestimento por diversas causas podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento, provocando a desagregação dessas camadas, e acrescenta que o remendo é o preenchimento da panela com uma ou mais camadas de pavimento na operação denominada de "tapa-buraco".

4.2 Misturas Asfálticas

Basicamente, o CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo, é derivado do refino de petróleo. A mistura asfáltica é composta fundamentalmente da mistura de agregados em granulometrias variadas e o CAP. O CAP é sólido em seu estado natural e para que possa combinar com o material granular tem que ser liquefeito com a aplicação de calor, gerando assim o CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado à Quente.

Segundo Bernucci et al. (2010) as misturas asfálticas adequadamente proporcionada e processada, reivindicam os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local.

“O projeto de misturas asfálticas, assim como o projeto de outros materiais de engenharia, é uma questão de escolha e proporcionamento de materiais, a fim de obter a qualidade e propriedades desejadas” (THOMAS, 2015).

Bernucci et al. (2010), cita que a distribuição granulométrica dos agregados é uma das principais características que influi efetivamente no comportamento de misturas asfálticas, influenciando em propriedades como: rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, resistência ao dano por umidade, etc.

O Manual de Asfalto (1989) acrescenta que o objetivo final é a determinação de uma combinação e graduação de agregados dentro dos limites especificados e de um teor de asfalto correspondente, de modo a obter uma mistura com as seguintes características:

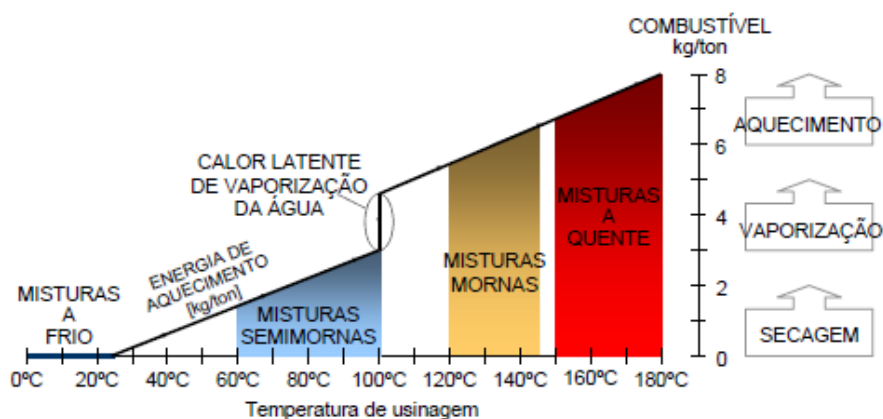
- Asfalto suficiente para assegurar um pavimento durável;
- Estabilidade suficiente que satisfaça a demanda de tráfego sem distorções ou deslocamentos;
- Vazios em quantidade suficiente na mistura compactada total de modo a permitir a expansão térmica do asfalto e agregado nas temperaturas de verão, contudo, em pequena quantidade que evita efeitos danosos do ar e umidade;
- Trabalhabilidade suficiente que permita a colocação adequada da mistura sem segregação.

As misturas asfálticas de revestimento podem ser fabricadas em usina específica (misturas usinadas), fixa ou móvel, ou preparadas na própria pista (tratamentos superficiais). Os revestimentos são também identificados quanto ao tipo de ligante: a quente com o uso de CAP, ou a frio com o uso de emulsão asfáltica de petróleo (BERNUCCI et al., 2010).

4.2.1 Misturas Asfálticas a Quente

De acordo com Motta (2011) os diferentes tipos de misturas asfálticas de usina podem ser classificados de acordo com a temperatura empregada em sua produção, podendo ser dividido basicamente em quatro grupos: misturas a quente, misturas mornas, misturas semimornas e misturas a frio, como pode ser observado da figura 4.

Figura 4 - Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de usinagem.



Fonte: Motta (2011) adaptado de D'Angelo et al. (2008)

As misturas asfálticas a quente são aquelas produzidas a temperaturas que variam entre 150°C e 180°C, sendo utilizadas como revestimento de rodovias em que se prevê um elevado volume de tráfego, possuindo maior resistência devido ao arranjo das partículas com granulometria bem graduada e a quantidade ideal de ligante asfáltico (BERNUCCI et al., 2010).

Segundo Coelho Júnior e Rocha (2013) as misturas a quente distinguem-se em vários tipos de acordo com o padrão granulométrico empregado e as exigências de características mecânicas, em função da aplicação a que se destina. A mistura asfáltica mais utilizada é o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Trata-se do produto da mistura convenientemente proporcionada de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante.

O Manual de Asfalto (1989) reforça que a mistura asfáltica a quente (CBUQ) apresenta-se como uma combinação de agregados uniformemente misturados e recobertos com asfalto. O concreto asfáltico de petróleo (CAP) é um tipo de mistura que deve satisfazer a requisitos rigorosos, apresentar massa densa, uniforme e de alta qualidade.

4.2.2 Misturas modificadas com agregado-borracha

Em obras de pavimentação, a borracha de pneus pode ser incorporada aos materiais asfálticos através de dois processos: úmido e seco. No processo úmido, a borracha moída de pneus descartados (cerca de 5 a 25% do peso total de ligante) é incorporada ao ligante asfáltico antes de se adicionar o agregado. Quando da adição de borracha ao ligante asfáltico, ocorre reação entre os componentes e a alteração de suas propriedades. No processo seco, a borracha de pneus é misturada com o agregado antes de se adicionar o ligante asfáltico. As técnicas de produção de mistura para o processo seco são semelhantes às utilizadas na produção de CAUQ convencional. (ODA, 2001).

Segundo Quinália (2005) esses processos possibilitam o aumento da resistência a deformações permanentes a altas temperaturas, a fadiga e ao envelhecimento.

Bertollo (2002) observaram que misturas modificadas com agregado-borracha com granulometria fina (1,18 – 0,15 mm) possuíam um melhor desempenho quanto à deformação permanente e flexibilidade, quando comparadas a misturas convencionais. Faria (2015) acrescenta que as misturas com agregado-borracha de granulometria mais grossa (9,5 – 0,60 mm) mostraram um excesso de deformação permanente e maior resiliência.

EPSS (1994) apud Salini (2000) informa que a adição de borracha pode exercer influência no comportamento relativo à propagação de trincas. Para que a mistura asfáltica retarde a propagação de trincas deve ser adicionada uma quantidade pequena de borracha, normalmente entre 1% e 2% em peso de agregado. Embora o peso seja pequeno, devido à baixa densidade o volume é significativo. A reação (ou combinação) entre a borracha e o cimento asfáltico não aparenta ter importância significativa sobre este aspecto do comportamento das misturas projetadas pelo processo seco.

Bertollo et al. (2002b) informaram que quando se adiciona borracha em uma mistura asfáltica pelo processo seco, as partículas mais finas da borracha reagem com o ligante enquanto que as partículas maiores atuam como “agregados elásticos” no concreto asfáltico. A combinação de ligante modificado e aumento da elasticidade das misturas asfálticas tende a produzir pavimentos mais resistentes à fadiga e ao trincamento a baixas temperaturas. Existem evidências, também, de que a adição de borracha triturada, dentro de certos limites, aumenta a resistência à deformação permanente em relação às misturas convencionais.

4.2.3 Misturas modificadas com aditivo surfactante

Conforme pesquisado por Rubio et al. (2011) as misturas asfálticas com aditivo surfactante não dependem de espuma ou redução de viscosidade para diminuir as temperaturas de produção e compactação. O aditivo surfactante ajuda a melhorar a trabalhabilidade da mistura e compactação e promove melhor adesividade. Esse mesmo autor acrescenta que a quantidade de aditivo necessário para redução da temperatura depende do tipo de produto e devem ser misturados com o ligante antes da mistura com os agregados

Segundo Genesseeux (2015) os aditivos não alteram a viscosidade do ligante asfáltico, esse aditivo promove uma melhor molhabilidade do agregado pelo ligante, por meio da redução da tensão superficial. Zaumanis et al. (2018) confirma essa atribuição dos aditivos ativos que agem como facilitadores de adesão, frequentemente disponíveis em forma líquida.

O uso do aditivo Evotherm é indicado às operações de serviços de tapa buraco com deslocamento ao local de aplicação sem perder a qualidade e especificações mínimas do CARQ, com redução de temperatura variando de 15 a 50 °C.

Segundo Olard e Romier (2016) a temperatura da mistura asfáltica é bem reduzida oferecendo melhores condições de serviço aos trabalhadores e equipe em campo, assim como um ganho em termos de limpeza dos equipamentos pela umidade residual de 0,5% na mistura final com redução do uso de solventes nessa limpeza.

Olard (2008) apud Motta (2011) complementa que da mesma forma que as misturas mornas apresentam um maior potencial de estocagem e transporte, em comparação com as misturas a quente, a mistura com adição de aditivo surfactante também exerce esse papel, seja na ocorrência de chuva ou situação similar, com possibilidade de tempo de espera excedente, evitando perda de material com descartes ocasionais.

Motta (2011) relata em sua pesquisa uma experiência com a tecnologia Evotherm onde a mistura morna permaneceu estocada por 17 horas após usinagem e ainda pôde ser aplicada e compactada adequadamente a 96°C sendo a temperatura recomendada de 107°C.

A dosagem do aditivo Evotherm usuais são indicadas na faixa de 0,25 a 0,75% do peso total de ligante na mistura, sendo este ligante total o somatório de ligante virgem mais o percentual de ligante recuperado do fresado das camadas antigas (NEW YORK STATE, 2013).

Segundo Endres (2016) a aplicação do Evotherm na mistura não implica alterações nas plantas das usinas de concreto asfáltico além disso a diferença de custo com seu uso é pequena ou até menor se comparado com as misturas mornas em detrimento às misturas a quente em projetos com a mesma espessura de revestimento.

4.3 Reciclagem do cimento asfáltico fresado (CAF)

Balbo e Domingues (2006) afirmam que a reabilitação e manutenção corretiva de pavimentos asfálticos urbanos produzem grande quantidade de material reciclável, ou seja, fresados ou pedaços de misturas asfálticas antigas.

Entende-se por fresagem a operação de corte parcial ou total, por uso de equipamentos especiais, do revestimento asfáltico existente em um trecho de via, que englobem ou não outra camada do pavimento, objetivando a restauração da qualidade do rolamento da superfície, ou melhorias na sua capacidade de suporte (BERNUCCI et al., 2010).

De acordo com DNIT (2006a) a reciclagem de pavimentos se baseia na reutilização dos materiais fresados, no processo de reutilização da mistura asfáltica envelhecidas e deteriorada para produção de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes

remanescentes, combinados com agentes rejuvenescedores e ou ligantes asfálticos novos.

A figura 5 apresenta um exemplo de máquina fresadora utilizada para as operações de corte de pavimentos flexíveis. A profundidade do corte é pré-ajustada de acordo com o projeto de pavimentação.

Figura 5 - Fotografia da máquina fresadora



Fonte: Bernucci et al. (2010)

A figura 6 apresenta os rolos especiais munidos de pontas cortantes diamantadas.

Figura 6 - Imagem do rolo de corte de uma fresadora



Fonte: Bernucci et al. (2010)

As dimensões finais das partículas são determinadas pela profundidade do corte, velocidade de avanço da máquina, revestimento do pavimento, condições ambientais e teor de asfalto. (DNIT-IPR-720, 2006).

“A principal vantagem da fresagem a frio é que o material depois de fresado apresenta uma granulometria apropriada para a reciclagem e sem processamento adicional, exceto para remover fragmentos de dimensões maiores” (DNIT-IPR-720, 2006).

Segundo Souza (2009) as técnicas de fresagem da superfície dos pavimentos e de reciclagem dos materiais de pavimentação são ferramentas de restauração que podem intervir nos pavimentos em várias amplitudes, isto é, podem restaurar vários graus de gravidade do estado de deterioração dos pavimentos. Esta capacidade para atender a diferentes demandas dos projetos de restauração é uma comprovação da versatilidade da restauração por reciclagem.

A camada asfáltica de pavimentos é fresada com o intuito de retirar o material envelhecido (oxidado e enrijecido) e manter a geometria horizontal (greide) do pavimento ao adicionar a nova camada asfáltica.

Segundo contexto apresentado por Lima (2003):

As vantagens da utilização da técnica da reciclagem na conservação de vias vão desde a economia de materiais, até a preservação do meio ambiente. Com a diminuição do consumo dos materiais asfálticos, de alto valor comercial, e dos materiais agregados, há uma diminuição dos custos das obras. A reciclagem contribui para a preservação ambiental, uma vez que evita a exploração agressiva das áreas de exploração, ocasionada pela redução da área de exploração de jazidas.

Zaumanis e Mallick apontam que (2014c) o asfalto é o material mais reciclado nos EUA com uma taxa de reutilização de 99%. Entretanto, em média, apenas 10 a 20% de pavimento de asfalto recuperado (CAF) é usado em determinados projeto como novas misturas asfálticas e grande parte é destinado para uso em aplicações menos nobres. Balbo e Domingues (2006) reforçam que seu emprego como bases de agregados em pavimentação de vias, subestima o potencial do material tanto em termos granulométricos quanto no que diz respeito ao ligante asfáltico presente.

De acordo com Prowell; Hurley (2007) apud Genesseeux (2015) nos últimos anos, houve um aumento de reciclagem de misturas asfálticas, porém as quantidades de fresado adicionado às misturas asfálticas recicladas ainda é modesto. Nos Estados Unidos, os pavimentos asfálticos são os materiais mais reciclados, com mais de 80 milhões de toneladas por ano, o que representa aproximadamente duas vezes mais que o total dos quatro resíduos mais reciclados, que são papéis, vidros, plásticos e alumínio (40 milhões de toneladas por ano).

Com o objetivo de reduzir a demanda de novos asfaltos e agregados virgens, mais atenção tem sido dedicada ao aumento do conteúdo de CAF em misturas asfálticas (PADULA, 2016).

4.4 Dosagens das misturas asfálticas

O método de dosagem de misturas asfálticas mais utilizado em todo o mundo, é o método Marshall, incluído num grupo de métodos empíricos. Esse método, basicamente, consiste em compactar e ensaiar no mínimo três corpos de para diferentes teores de betume e para determinada curva granulométrica no compactador Marshall para determinação da Estabilidade e Fluência Marshall (MENDES, 2011).

Nascimento (2011) acrescenta que a metodologia Marshall foi desenvolvida na década de 40 por Bruce Marshall do Departamento de Transporte do Estado do Mississippi (EUA). Este método foi baseado em um experimento laboratorial, que faz a dosagem de uma mistura asfáltica de forma a atender especificações tais como: estabilidade, fluência e parâmetros volumétricos.

Leal e Castro (2007) descrevem que apesar do método de estabilidade Marshall ser contestado por alguns autores, em virtude da dispersão de seus resultados e do confinamento do corpo-de-prova, a estabilidade é um dos parâmetros mais utilizados para dosagem e controle de qualidade das misturas asfálticas.

A metodologia proposta por Castro Neto propõe que as misturas asfálticas recicladas a quente tenham seu teor de projeto determinado através de ensaios de caracterização mecânica (Lima, 2003).

Bernucci et al. (2010) dispõe que o método proposto por Castro Neto considera o comportamento da mistura reciclada com diferentes valores de teores de ligante novo através da avaliação dos resultados de ensaio na caracterização mecânica dos corpos de prova.

Segundo o Manual Básico de Reciclagem de Pavimentos (2001) de um modo geral, o objetivo a ser atingido pelo dimensionamento das Misturas Asfálticas Recicladas é restaurar as propriedades do ligante asfáltico envelhecido por mudanças ocorridas pelo tempo, pelo tráfego e pelo próprio processo de reciclagem, de maneira a se aproximarem de um CBUQ novo.

A Manual Básico de Reciclagem de Pavimentos (2001) acrescenta que originalmente, os dimensionamentos de misturas asfálticas recicladas a quente *in-situ* consideravam, principalmente, a viscosidade do ligante asfáltico envelhecido e a quantidade de rejuvenescedor necessário.

Segundo Bernucci et al. (2010), o método proposto por Castro Neto (2000) para dosagem de misturas recicladas a quente, embora considere apenas indiretamente a reologia do ligante envelhecido e recuperado, apresenta a vantagem de se basear em parâmetros mecânicos para a determinação do teor de ligante novo e do teor total de ligante (novo e envelhecido) na mistura reciclada. Conforme confirmado por Lima (2003) os procedimentos de dosagem segundo Castro Neto dispensam a fase do processo relacionado à recuperação do ligante envelhecido, uma vez que a consistência deste ligante não é fator determinante para definição do teor de projeto.

Sabe-se (Medeiros, 2009) que os critérios volumétricos e de estabilidade e fluência para estabelecer o teor de projeto de uma mistura não garante que esse o teor seja o melhor para o comportamento das misturas betuminosas. Com a proposta do método de dosagem racional (métodos mecanísticos), que consiste na análise de deformações e tensões em meios elásticos, recomenda-se que a dosagem seja realizada com certos níveis de resistência a tração (RT) e módulo de resiliência (MR) para que a estrutura do pavimento não sofra redução de sua vida útil (BERNUCCI et al., 2010).

Já para Lima, 2003, um dos pontos mais importantes nas dosagens de misturas recicladas a quente é a extração do ligante envelhecido devendo se considerar um método de extração e recuperação do ligante envelhecido. A porcentagem de ligante recuperado é um ponto de partida para a determinação da dosagem final de projeto.

Na pesquisa de Genesseeaux (2015) a fração fina apresentou teor de ligante de 8,5 % e a mais graúda um teor de 3,2%, informando a importância dos finos do CAF em termos de ligante asfáltico, já que o ligante é material de maior custo da na produção de misturas asfálticas. Esse mesmo autor conclui que um estoque de fresado originado de uma única fonte (único trecho fresado) é positivo em evitar maior variabilidade nas propriedades do ligante.

Segundo o DNIT-IPR-700 (2017), agregado graúdo, se referindo a material usado em pavimento flexível, inerte em relação aos demais componentes é o que fica retido na peneira nº 10. E o agregado miúdo, que passa na peneira nº 10.

Genesseeaux (2015) complementa que o material asfáltico fresado é um material que apresenta dificuldades para ser caracterizado, controlado e reutilizado e que a sua homogeneidade pode afetar as propriedades da mistura asfáltica reciclada, principalmente quando é feita em taxas elevadas.

4.5 Módulo de Resiliência

Segundo a norma DNIT 135/2018 - ME, o módulo de resiliência é a relação entre a tensão horizontal resultante da carga cíclica e a correspondente deformação horizontal resultante do deslocamento horizontal recuperável em cada ciclo. Essa norma determina os procedimentos para execução dos ensaios de módulo de resiliência no Brasil.

O módulo de resiliência é um parâmetro importante na caracterização mecânica dos pavimentos flexíveis em determinar as tensões e deformações decorrentes das cargas aplicadas no pavimento pelo tráfego de veículos. Segundo Marques (2004) o módulo de rigidez serve para medir a rigidez das misturas asfálticas.

O módulo de elasticidade dos materiais não é uma medida de resistência. A resistência do material está associada à tensão necessária para se romper, ao passo que a elasticidade significa que o material retorna à sua forma e tamanho original, logo após cessado o esforço. Entretanto, o módulo de elasticidade é uma medida da rigidez do material, e pode produzir uma indicação da condição ou qualidade do material (FHWA, 1993, apud Marques 2004).

Segundo Balbo (2007) a correlação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração tem sido empregada em projetos de dosagens de misturas asfálticas, sendo que quanto mais rígido se apresenta um material maior é sua capacidade, de camada, em reter esforços.

A mistura asfáltica produzida a partir de 100% de material reciclado tem tendência a maior grau de rigidez, isso se deve ao estado de oxidação e envelhecimento do ligante recuperado. Segundo Bernucci et al. (2010) a medida que as misturas asfálticas envelhecem tendem a aumentar a resistência à tração assim como o módulo de resiliência, que pode não ser vantajoso devido à perda de sua flexibilidade.

“Equacionar o comportamento do revestimento asfáltico de um pavimento implica também se identificar que as diversas variáveis atuarão sobre a estrutura e como resultante dessas variações descreverão o comportamento do MR do CAUQ.” CAVALEIRO e OLIVEIRA, 2018, p.88).

Em sua pesquisa Cavaleiro e Oliveira (2018) constataram que o MR de pavimentos flexíveis sofre alteração ao longo do tempo:

A interferência causada no MR do CAUQ é verificada por fatores como: (i) Espessura da camada: quanto maior a espessura, menor a superfície específica, menor a oxidação, e conseqüentemente, menor variação de MR (sofrem menos enrijecimento ao longo do tempo); (ii) Tipo de ligante: a natureza do CAP pode determinar variações mais significativas de MR (sofrem mais ou menos enrijecimento ao longo do tempo); (iii) Intemperismo (temperatura e radiação solar): quanto maior a temperatura menor é o MR, bem como quanto maior a exposição à radiação solar, maior é o enrijecimento ao longo do tempo, e (iv) Usinagem, estocagem e transporte: influenciam sempre no sentido de aumentar o MR devido a oxidação do ligante. (CAVALEIRO e OLIVEIRA, 2018).

Cuidado deve se toma em projetos com mistura asfáltica reciclada nas correlações entre módulo de resiliência e resistência à tração em referência às misturas asfálticas convencionais para não se distanciar de valores comumente apresentados devido poucos resultados de desempenho, de tais projetos, com asfalto reciclado.

4.6 Agentes Rejuvenescedores

Como relatado por Bernucci et al. (2010), com o passar do tempo, o ligante asfáltico vai perdendo alguns de seus componentes e sofre certo enrijecimento. Uma das técnicas atuais de recuperação da flexibilidade do ligante é a reciclagem a quente ou a frio. Para isso, é utilizado um produto especialmente preparado para funcionar como um repositor de frações maltênicas do ligante envelhecido, chamado agente rejuvenescedor.

“Assim, durante a sua vida útil, o ligante asfáltico torna-se mais rígido e quebradiço, o que leva a formação de fissuras e degradação do pavimento. O processo de degradação do ligante asfáltico é chamado de envelhecimento” (SILVA et al, 2009).

“O ligante asfáltico utilizado em pavimentação pode se oxidar devido a vários fatores, tais como a presença de oxigênio, exposição à radiação ultravioleta e variações de temperatura.” (HERRINGTON; BALL, 1996 apud SILVA, 2009).

Segundo Lima (2003), “O efeito da temperatura e das demais condições climáticas nos pavimentos asfálticos causa seu envelhecimento que leva a um enrijecimento da mistura betuminosa.”

O Manual de Restauração do DNIT (2006b) complementa que fatores como a oxidação e volatilização envelhecem o asfalto perdendo suas propriedades originais, que podem ser reestabelecidas com adição de asfalto novo ou agente rejuvenescedor.

Ongel e Hugener (2015) perfazem que é possível obter as mesmas propriedades reológicas da mistura com ligante virgem e da mistura rejuvenescida, no entanto, a composição química na proporção de asfaltenos em maltenos, da mistura rejuvenescida é significativamente diferente da mistura virgem o que pode afetar o

desempenho em longo prazo da mistura reciclada. O desempenho do ligante rejuvenescido também é altamente dependente da quantidade de rejuvenescedor, portanto, as quantidades ideais para diferentes rejuvenescedores devem ser determinadas para diferentes tipos de ligantes envelhecidos.

O agente rejuvenescedor faz parte da composição do ligante asfáltico, e são utilizados em processos de reciclagem a quente, seja em usina ou *in situ*, conforme descrito:

[...] os agentes rejuvenescedores (AR's), também conhecidos como rejuvenescedores de asfaltos oxidados, são ricos em maltenos, produtos existentes no asfalto e perdidos no processo de oxidação [...] tendo como objetivo melhorar ou recuperar a durabilidade do material reciclado. No caso de reciclagem a quente, o material depois de fresado é remisturado e tratado termicamente com adição de ligantes e/ou AR's, com ou sem correção granulométrica (LIMA, 2003).

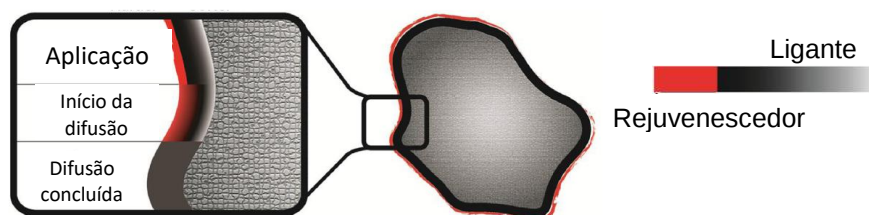
No entanto, Zaumanis et al. informa (2014d) que os agentes de reciclagem têm como objetivo principal a redução da rigidez da mistura e podem provocar um aumento das deformações se utilizados de forma inadequada. O mesmo autor acrescenta que dois fatores principais devem ser levados em conta para evitar a formação de deformações plásticas:

- A dose do agente de reciclagem deve ser cuidadosamente escolhida para não amolecer demais a mistura.
- Uma difusão suficiente do agente de reciclagem no ligante deve ter ocorrido antes da abertura para o tráfego. A difusão insuficiente formará uma camada superior de ligante.

Segundo Zaumanis et al. (2014d) a difusão continua durante o armazenamento, transporte e colocação do asfalto. Cuidados devem ser tomados em permitir a finalização do agente de reciclagem de difusão evitando resultados falsos de ensaios.

A difusão incompleta do rejuvenescedor pode falsear resultados de desempenho de laboratório e campo, como pode ser observado na ilustração figura 7.

Figura 7 - Processo de difusão do rejuvenescedor



Fonte: Zaumanis et al. (2014d)

Segundo Genesseeux (2015) ainda há dúvidas se o ligante do material fresado é 100% remobilizado ou não durante o processo de reciclagem.

O Manual Básico de Reciclagem de Pavimentos (2001) destaca que imediatamente após sua adição e através do processo de mistura, o agente rejuvenescedor recobre a superfície do ligante asfáltico envelhecido. O AR penetra o ligante asfáltico velho a um ritmo dependente das propriedades destes e das propriedades ou reatividade do próprio AR.

Esse mesmo manual acrescenta que se as condições forem ótimas e o AR for compatível com o ligante velho, o AR se difundirá pelo ligante envelhecido, produzindo um material híbrido que atua como um único material mais mole. A mistura resultante tem um aspecto de uma mistura nova e um comportamento que se projetou. Podendo o efeito do rejuvenescimento ser determinado pelos ensaios das propriedades físicas da mistura reciclada ou do ligante.

4.7 Operações de tapa buracos

Segundo DER/PR ES-P 12/05 (2005) tapa-buraco é o reparo superficial do pavimento asfáltico, na profundidade da camada de revestimento. As cavidades formadas no revestimento asfáltico, tecnicamente chamados de panela, é um defeito do pavimento provocado pelo estágio avançado de fadiga e desgaste localizado na superfície do pavimento.

O Manual Prático de Operações de Tapa-Buracos do município de Belo Horizonte (2011) define:

Panelas (buracos): Cavidades formadas inicialmente no revestimento do pavimento e que possuem dimensões variadas. Trata-se de defeito de natureza grave uma vez que afeta estruturalmente o pavimento, permitindo o acesso das águas superficiais indesejáveis às demais camadas da estrutura, e das condições de segurança do tráfego e no custo operacional. Suas causas prováveis estão relacionadas com o estágio terminal de trincamento por fadiga e/ou desintegração localizada na superfície (desgaste ou desagregação de severidade alta).

A diretriz dessa pesquisa se limitará aos problemas de buracos nas vias, já definidos como panelas, visto que esse defeito afeta diretamente o tráfego nas cidades, seja ocasionando acidentes, ou diminuição na velocidade operacional, gerando custo no transporte (privado ou público), principalmente afetando a segurança e conforto dos usuários.

“Uma das melhores soluções para resolver esse tipo problemas nos pavimentos são os remendos ou tapa-buracos feitos diretamente sobre a região afetada, por ser um método simples, rápido e eficaz” (XAVIER et al.,2014).

De acordo com DNIT-IPR-710 (2005), à medida que o pavimento vai se aproximando do entorno do seu final de ciclo, o nível de esforço (NE) dos serviços necessários, para mantê-lo dentro do desempenho previsível vai tendendo a aumentar. Estima-se que um valor máximo admissível para o NE relativo à execução, de tapa-buracos seja da ordem de 10m³/km por ano.

Segundo Clifton Associates (2012) o pavimento incorre em danos por dois motivos principais: condições ambientais e carga de tráfego. O último consiste em caminhões pesados que aplicam pressão significativa sobre a superfície do pavimento, fazendo com que se flexione, causando fadiga e rachaduras. Biswas (2016) acrescenta que os buracos são uma das deteriorações de ocorrência mais comum do pavimento asfáltico dispensando atenção constante.

Clifton Associates (2012) ressalta que a manutenção preventiva é uma estratégia de gerenciamento de vias e rodovias que tem sido comprovada por muitas agências em custar significativamente menos no longo prazo do que a manutenção reativa.

O uso do CAF em novas misturas asfálticas para serviços de manutenção e conservação do revestimento é uma maneira efetiva da reutilização desse material em pavimentos novos.

Segundo Clifton Associates (2012) a qualidade da mistura do remendo afeta muito a durabilidade e a qualidade do remendo; é aconselhável usar sempre o melhor material disponível.

Biswas (2016) acrescenta que os materiais para tapa-buracos devem ter algumas propriedades especiais e importantes para um remendo mais duradouro. As propriedades mais importantes são descritas abaixo.

Estabilidade: A estabilidade é uma das propriedades críticas da mistura que ajuda a resistir às deformações verticais e horizontais do buraco causadas por cargas de tráfego (BISWAS, 2016). A estabilidade está relacionada com as características do material da mistura de remendos e pode ser aumentada usando um agregado com boa cubicidade e boa rugosidade (PIMENTEL, 2007; BERNUCCI et. al, 2010; ZAUMANIS et al., 2018).

Trabalhabilidade: A temperatura é o fator mais importante na trabalhabilidade de uma mistura, uma vez que controla a viscosidade do ligante betuminoso. A trabalhabilidade de uma mistura asfáltica reciclada para tapa buracos pode ser aumentada com o uso de aditivo (BISWAS, 2016), agente rejuvenescedor e ligante novo mais macio.

Durabilidade: Uma mistura para remendo é considerada mais durável quando sua perda de massa ou desgaste é satisfatório. (BISWAS, 2016; PIMENTEL, 2007). Esses mesmos autores acrescentam que os remendos executados com mistura asfáltica a quente são mais duráveis.

O Manual Prático de Operações de Tapa-Buracos de Belo Horizonte (2011) apresenta o procedimento executivos para tapa-buracos superficiais de até 5 cm e para espessuras de 5 a 15 cm para revestimentos asfálticos. A sequência suscita de operação é basicamente:

1) delimitar a área a ser cortada em uma figura geométrica. 2) cortar o revestimento com equipamento apropriado perfazendo a face de corte com um ângulo de 90° com o revestimento existente. 3) remover os resíduos provenientes do corte e efetuar a limpeza com vassouras ou compressor. 4) após a pintura de ligação preencher o buraco com a mistura asfáltica dimensionada, ou camada de base antes do revestimento no caso de o buraco ultrapassar a espessura de revestimento. 5) executar outra pintura de ligação após compactação com compactador tipo vibratório. 6) por fim a limpeza com varrição do material excedente.

Pode se dizer que essa técnica se assemelha à técnica chamada de semipermanente na literatura internacional.

A figura 8 apresenta a delimitação da área de corte e o início do serviço de correção na limitação do reparo do pavimento existente.

Figura 8 - Delimitação e corte da área geométrica



Fonte: Xavier et al. (2014)

A figura 9 apresenta a deposição do CBUQ na operação de reparo superficial do pavimento asfáltico existente, na profundidade da camada de revestimento asfáltico, cuja execução se fez por processo manual e compactação mecânica.

Figura 9 - Deposição do CBUQ e compactação



Fonte: Xavier et al. (2014)

A figura 10 apresenta aplicação da pintura de ligação após o preenchimento com o CBUQ.

Figura 10 - Aplicação da pintura de ligação



Fonte: Xavier et al. (2014)

A prefeitura municipal de Belo Horizonte, através do Manual Prático de Operações de Tapa-Buracos de Belo Horizonte (2011), admite aplicação de novos tipos de materiais diferentes dos listados no manual prático de operações de tapa-buracos ou mesmo novos procedimentos de reposição de e/ou reparação de buracos como item de desenvolvimento de novas tecnologias, desde que sejam apresentados previamente para a análise, autorização e acompanhamento do comportamento do pavimento reposto para avaliação.

Segundo Clifton Associates (2012) o método deve ser escolhido de acordo com a condições de contorno do local, mas em regra geral, os métodos mais eficientes são o *throw-and-roll* e injeção de spray. Além desses existe o método semi-permanente que é mais caro, tradicional e duradouro.

O método semi-permanente consiste basicamente em: cortar o revestimento nas limitações do reparo em forma circular ou quadrada com bordas verticais; remover toda a água e material solto; secar e selar o buraco com material aderente tipo emulsão; preencher o buraco com a mistura asfáltica de acordo com o projeto de pavimentação e realizar a compactação com compactador vibratório ou similar.

A técnica *throw-and-roll* é o método de remendo mais utilizado no Canadá. Este procedimento simples e rápido consiste em colocar material no buraco, compactando-o com os pneus do caminhão, para isso é deixado um alteamento de 3 a 6 mm acima do buraco. Muitas vezes esse método é usado para um reparo temporário, em países com invernos mais rigorosos é indicada para reparos provisórios. A figura 11 apresenta as etapas dessa técnica.

Figura 11 - Técnica *Throw-and-roll*



Fonte: Biswas (2016)

A técnica *throw-and-roll* pode ser tratada como reparo permanente com a diferença do material lançado após a limpeza seja a mistura asfáltica a quente dimensionada e com uso de equipamento compactador vibratório.

A técnica de injeção spray usa um equipamento especial para aquecer o ligante asfáltico, misturá-la com agregado e pulverizar a mistura no buraco. Os benefícios dessa técnica incluem reparo rápido e capacidade de reparar buracos em climas adversos. As desvantagens incluem maior custo de remendo para pequenas quantidades usadas e a grande vantagem é a possibilidade de adição de granulado de borracha. A figura 12 mostra as etapas dessa técnica: a) pulverização para retirada de água e detritos; b) injeção da mistura asfáltica; c) cobertura da superfície com agregado miúdo e seco.

Figura 12 - Técnica Injeção por spray



Fonte: Biswas (2016)

Conforme Clifton Associates (2012) especialmente para materiais de remendo de mistura quente, a viabilidade de execução e de compactação adequada depende da temperatura da mistura no momento da execução. Quando os materiais de correção são preparados fora do local em uma central de mistura, é fundamental transportá-los para o destino sem resfriá-los abaixo da temperatura de compactação ideal. As caixas quentes, como a que se observa na figura 13, não só ajudam a transportar o material para reparo enquanto mantêm a temperatura, mas também permitem o armazenamento durante a noite. Eles têm a vantagem adicional de permitir os reparos no inverno.

Figura 13 - Equipamento para transporte e armazenamento materiais



Fonte: Clifton Associates (2008)

Além disso Clifton Associates (2012) cita que as unidades do tipo reboque são mais simples de serem usadas por serem bem menores do que as unidades autônomas.

4.8 Usinas para reciclagem a quente de CAF

A produção de concreto asfáltico (BERNUCCI et al., 2010) é basicamente realizada em dois tipos de usinas com várias capacidades, que são:

- usinas descontínuas; gravimétricas de planta fixa;
- usinas contínuas, volumétricas e as TSM – Tambor Secador Misturador (*drum-mixer*) que podem ser móveis.

“A reciclagem a quente de CAF demanda o uso de usinas de misturas asfálticas apropriadas para a produção do Concreto Asfáltico Reciclado a Quente – CARQ.” AGUILAR, 2016.

Como já citado por Nascimento (2011) a reciclagem a quente em usina estacionária, com instalações fixas, ou *in situ*, segue às especificações de serviço do DNIT, ES 033/2005 (usina estacionária) e ES 034/2005 (reciclagem *in situ*).

Segundo Balbo e Domingues (2006) décadas atrás as dificuldades de reciclagem de misturas asfálticas em usinas gravimétricas eram restrições sérias a esse tipo de reemprego de material asfáltico. Contudo, após a introdução de usinas do tipo *drum mixer*, aquecer o agregado novo e misturá-lo aos fresados foi pouco a pouco criando as condições adequadas para a reciclagem a quente.

Segundo Oliveira (2013) o objetivo principal em separar o CAF em frações graúdas e miúdas é facilitar o aquecimento dessas frações em diferentes temperaturas na produção das misturas recicladas, a fim de evitar um efeito de envelhecimento excessivo do aglutinante durante o processo de produção.

Balbo e Domingues (2006) reforçam que a maior questão de ordem prática na reciclagem a quente, seja um eficiente aquecimento e homogeneização (remistura) do material, combinada com fácil locomoção dentro de vias urbanas e com a necessidade de pequenos volumes de reciclagem, sendo também em parte resolvida com o surgimento no mercado de equipamentos mini usinas (*drum mixer*) transportáveis. Diferentes das usinas convencionais nestas, a mistura é feita no próprio tambor de secagem.

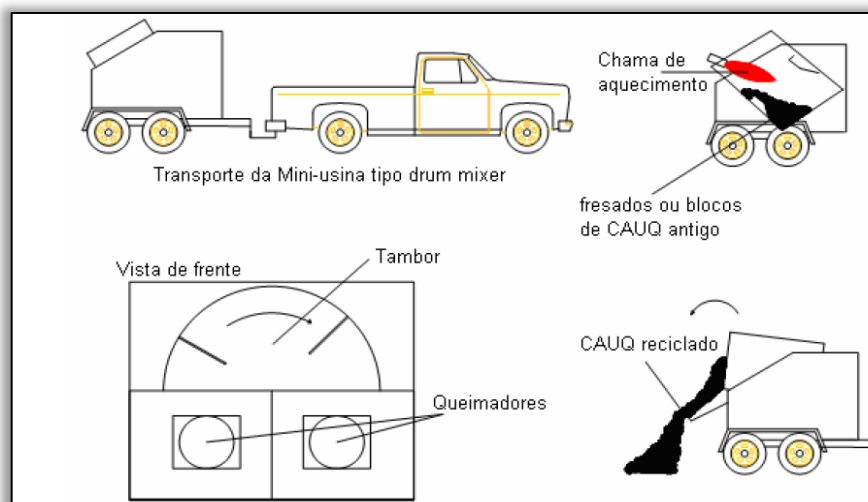
“Na última década, o emprego de mini usinas transportáveis têm crescido, aproveitando-se dos fresados e pedaços de revestimentos asfáltico antigos para a produção de CAUQ reciclado para serviços de manutenção corretiva” (BALBO e DOMINGUES, 2006).

O concreto asfáltico usinado a quente - CAUQ seria o mais eficiente material para a execução de remendos em pavimentos. Todavia tal material pode ser indisponível para muitas cidades do interior que não dispõe de usinas fixas bem como durante feriados e finais de semana. (BALBO e DOMINGUES, 2006).

Balbo e Domingues (2006) exemplificam na figura 14, esquematicamente, as fases de operação das minis usinas recicladoras a quente transportável, com capacidade unitária de 1 a 2 toneladas por lote, e aquecimento realizado por conjunto de chamas queimadoras. O tambor pode ser abastecido com 100% de fresados ou CAUQ antigo em pedaços, ou acrescentando-se parcialmente novos agregados, bem como se

adicionando novo CAP ou AR de modo bastante simples (manual), sendo depois a mistura aquecida e remisturada.

Figura 14 - Fases de operação de uma mini usina recicladora



Fonte: Balbo e Domingues (2006)

De acordo com a abordagem apresentada por Aguilar (2016).

Existem usinas recicladoras de pequeno porte (mini recicladoras) a custo mais acessível que permitem a reciclagem de 100% do CAF. Tais usinas estão disponíveis nos mercados de países da Europa e Estados Unidos, dentre outros, onde são utilizadas, principalmente, para reciclagem do CAF e aplicação do CARQ em operações de tapa buracos. As minis recicladoras de CAF são móveis, construídas sobre carretas que podem ser rebocadas por veículos leves, o que permite a reciclagem in loco e, consequentemente, podem minimizar custos operacionais.

“[...] as minis recicladoras de concreto asfáltico podem ser utilizadas para reciclar 100% de CAF para aplicação do CARQ [...]” (AGUILAR, 2016, p.20).

Outro ponto importante, segundo Balbo e Domingues (2006), a produção de CAUQ de qualidade satisfatória depende do estudo do aquecimento dos recicláveis na mini usina com adição de agentes de reciclagem ou Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). O fresado para reciclagem é rico em ligante e esse material não pode ser exposto ao calor excessivo, pois tem as suas propriedades comprometidas.

Zaumanis et al. (2014b) também afirmam que a quantidade máxima de asfalto recuperado é limitada principalmente pela tecnologia das usinas disponíveis. Os

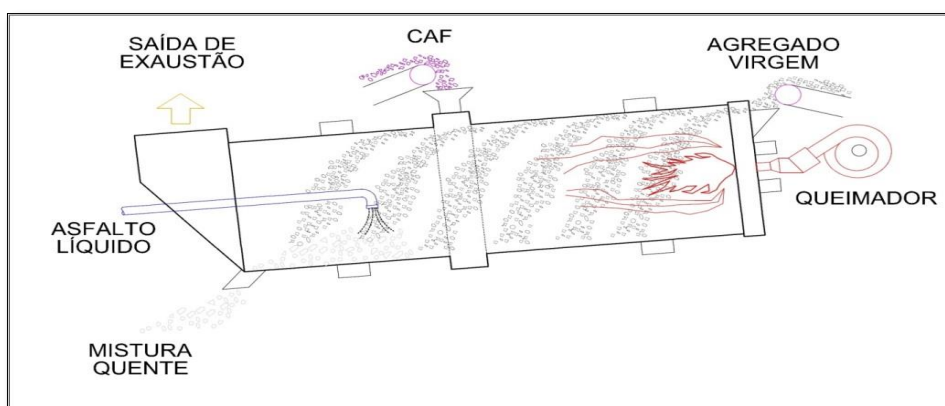
materiais virgens superaquecidos aquecem os agregados recuperados impondo assim limitações na quantidade de CAF adicionado. A reciclagem asfáltica realizada em usinas convencionais pode ser realizada com quantidades até 20% de CAF sem grandes ajustes.

Zaumanis et al. (2014b) relatam que para produzir misturas de maior conteúdo de CAF usando usinas convencionais pode exigir uma temperatura de superaquecimento dos agregados virgens, causando fumaça escura da volatilização do ligante envelhecido existente no CAF e até incêndios nos tambores de secagem.

Conforme Zubaram (2011) um sistema de gestão do CAF incluindo beneficiamento, dosagem e aquecimento dos materiais fresados, as usinas convencionais são capazes de realizar misturas com até 50% de incidência de CAF. O mesmo autor afirma que as usinas convencionais podem ser adaptadas, para o recebimento de CAF, através da abertura para recebimento do material a ser reciclado no tambor secador em uma zona onde a temperatura não ultrapassa os limites demandados pelo ligante asfáltico e não tenha contato com as chamas.

Zubaram (2011) conclui que a solução para uso de quantidades maiores de CAF é fracionar o reciclado em materiais finos e grossos, de modo que o fino, que apresenta maior quantidade de CAP devido à sua maior área superficial, não receba forte radiação do queimador, como pode ser observado na figura 15.

Figura 15 - Usina do tipo *drum mixer* com entrada central para o CAF



Fonte: Adaptado de Kandhall e Mallick (1997) apud AGUILAR (2016)

Zaumanis e Mallick confirmam (2014c) afirmando que a quantidade de RAP em misturas de asfalto pode ser significativamente aumentada com a aplicação de boas práticas de gestão de RAP utilizando tecnologias de produção modernas e disponíveis alinhado a um conhecimento avançado de projeto de pavimentação.

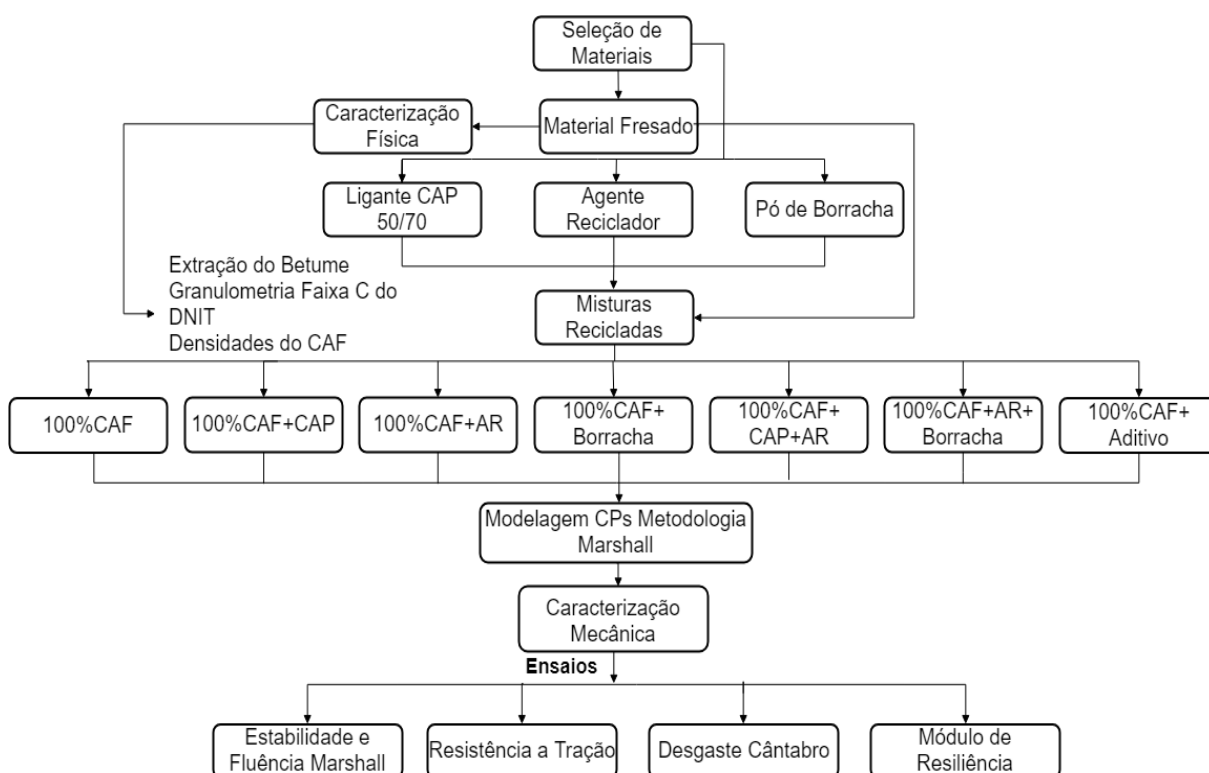
Segundo Zaumanis e Mallick (2014c) atualmente existem onze tecnologias prontamente disponíveis para a produção de 100% de misturas asfálticas a quente com pavimento asfáltico recuperado (CAF). Sendo que as Mini- usinas são as mais indicadas para serviços de manutenção nos centros urbanos.

Contudo destaca - se que é possível construir Mini-usinas adequadas para a reciclagem a quente de CAF de forma simples e econômica, o que poderia possibilitar a execução de serviços que demandem pequenas quantidades de material, como por exemplo serviços de tapa-buracos.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando alcançar os objetivos propostos nesse trabalho foi desenvolvido um planejamento experimental para a avaliação e análise de resultados mecânicos para as misturas asfálticas recicladas. A figura 16 apresenta de forma esquemática a estrutura das atividades desenvolvidas ao longo do período de pesquisa.

Figura 16 - Fluxograma da pesquisa experimental



Fonte: Própria autora

Neste capítulo serão relatados aspectos considerados importantes acerca da seleção e designação dos materiais, origens, procedimentos dos ensaios e o método da pesquisa. Serão descritos os ensaios de caracterização físico-química realizados no CAF e ensaios mecânicos realizados nas misturas recicladas a quente, após moldagem dos corpos de prova.

5.1 Materiais

Nesse tópico são descritas as etapas de seleção, coleta, preparo e caracterização dos materiais utilizados conforme planejamento apresentado na figura 16. Os materiais utilizados nessa pesquisa foram: Fresado (CAF), CAP, pó de borracha, aditivo surfactante - Evotherm e agente rejuvenescedor.

5.1.1 Fresado – CAF (Cimento Asfáltico Fresado)

O CAF utilizado nessa pesquisa foi obtido na rodovia estadual MG-050, sendo recolhido em dois pontos da rodovia, primeiro na altura marco quilométrico km 77+800 e o segundo no km 93+000, distrito Azurita na cidade de Mateus Leme, Minas Gerais, disponibilizado pela empresa concessionária AB Nascentes das Gerais. O material apresentava aspecto homogêneo livre de sujeiras como material orgânico ou solo, sugerindo que a respectiva fresagem ocorreu apenas na camada de rolamento, característica visual importante para essa pesquisa. A figura 17 mostra os locais de recolhimento do material.

Figura 17 - Foto dos locais de recolhimento do CAF - km 77+800 e 93+000



Fonte: Própria autora

Foram recolhidos 6 (seis) sacos de 50 kg, no primeiro local e mais 6 (seis) sacos de 50 kg no segundo local gerando um total de 600 kg de material disponível para os ensaios. O material retirado no km 93+000 foi utilizado apenas para os ensaios de módulo de resiliência ao final da pesquisa por esgotamento do material retirado no km 77+800. A figura 18 apresenta amostra do material *in natura* já no laboratório.

Figura 18 - Foto da amostragem do fresado *in natura*.



Fonte: Própria autora

O Uso de fresado de um mesmo local, ou mesma rodovia, é interessante para se evitar variabilidade de resultados em relação ao ligante recuperado (GENNESSEAU, 2015).

5.1.2 CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

Foi utilizado nesta pesquisa, como ligante, o CAP 50/70, fornecido pela NTA Asfaltos. Tido como um dos cimentos asfálticos de petróleo, para camadas de revestimento, mais convencional. Como a intenção foi avaliar as misturas asfálticas recicladas a quente dentro da realidade brasileira, optou-se pelo uso de ligantes com características conhecidas por pesquisas anteriores, e o mais consolidado na área de pavimentação. As características do CAP 50/70 podem ser observadas na tabela 1. A

temperatura de aquecimento das amostras de 40°C para o ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall foi determinada em função do ponto de amolecimento do CAP 50/70.

Tabela 1 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração

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

Fonte: Norma DNIT 095/2006 – EM

5.1.3 Pó de Borracha

A borracha vulcanizada utilizada neste trabalho foi fornecida pela NTA Asfaltos, procedente da CBL Comércio Reciclagem Borrachas de Betim, Minas Gerais. O processo de reciclagem de pneus tem como característica básica recuperar borrachas

vulcanizadas a baixas temperaturas (abaixo de 80°C). O produto gerado, dependendo da sua destinação é cortado e triturado em várias faixas granulométricas. Para essa pesquisa foi empregado a borracha em pó fina, com granulometria variando de 0,6 a 0,149 mm. Esse material apresenta alta homogeneidade e mantém muitas das propriedades físicas da composição original, interessantes para pavimentação como propriedades visco-elásticas contribuindo positivamente no processamento das misturas asfálticas modificadas. A figura 19 apresenta o pó de borracha disponibilizado para os ensaios.

Figura 19 - Pó de borracha utilizado na pesquisa



Fonte: Própria autora

5.1.4 Aditivo surfactante

O aditivo surfactante Evotherm P25 utilizado nessa pesquisa foi fornecido pela NTA Asfaltos. Esse agente surfactante é um produto que se apresenta no estado líquido, densidade de 1,00 g/cm³, ponto de fulgor de 180°C, pH em temperatura ambiente de 2,8.

O Evotherm - P25 é um aditivo tensoativo que permite maior trabalhabilidade reduzindo em até 50°C a temperatura de aplicação da mistura asfáltica, com a consequente diminuição da degradação do ligante por oxidação. Além disso permite o processamento de mistura, aperfeiçoa o projeto de mistura, tornando possível o uso

mais eficiente dos materiais, sobretudo o uso do material fresado. A figura 20 apresenta o aditivo surfactante - Evotherm P25.

Figura 20 - Aditivo surfactante – Evotherm P25 utilizado na pesquisa



Fonte: Própria autora

5.1.5 Agente Rejuvenecedor

O agente Rejuvenecedor Extrato NPA utilizado nessa pesquisa foi fornecido pela NTA Asfaltos. A figura 21 apresenta o material e sua quantificação.

Figura 21 - Agente rejuvenecedor utilizado na pesquisa



Fonte: Própria autora

As características técnicas do Extrato NPA estão disponibilizadas na tabela 2.

Tabela 2 - Características técnicas do Extrato Rejuvenescedor NPA

ENSAIO	MÉTODO	REQUISITO
Aparência	Visual	Opaco
Água por Destilação	ASTM D95	Max. 0,20%
Densidade a 20°C	IL-7.05.02	0.9610-1,0370 g/cm ³
Viscosidade a 60°C	ASTM D445	Min. 205,00 cSt
Viscosidade a 100°C	ASTM D445	26,10-32,278 cst
Ponto de Fulgor	IL-7.05.01	Min. 230°C
Teor de Asfaltenos	ASTM D2007	Máx. 0,10%
Matéria Volátil	ASTM D3175	Máx. 1,00%
Refratividade Interceptada	ASTMD2159	Máx. 1,0795
Ponto de Fluidez	ASTM D7346	Máx. 30°C
Teor de Xarope	ASTM D4927	Máx. 6,50%
Ponto de Anilina	ASTM D611	23 a 54°C
VGC	ASTM D2501	0,934 a 1,000
Teor de Carbono Aromático	ASTMD3238	Mín. 44,10%
Análise do tipo de Hidrocarboneto		
CA	ASTM D2140	43,50%
CN		9,10%
CP		47,40%

Fonte: NTA Asfaltos

5.2 Metodologia

A metodologia empregada nessa pesquisa utilizou de procedimentos laboratoriais, procedimentos esses aplicados na realização da análise das características dos materiais constituintes e das propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas.

O plano experimental empregou o denominado método Marshall de moldagem dos corpos de provas (CP), que faz uso da compactação por impacto, sendo este o mais usado no Brasil e no mundo.

5.2.1 Caracterização dos materiais componentes do CAF

Os ensaios realizados para caracterização do CAF de acordo com as normas técnicas pertinentes, foram:

- Ensaio para determinação do Teor de Betume;
- Ensaio para determinação das Curvas Granulométricas;
- Ensaio para determinação da densidade real e aparente dos agregados graúdos e miúdos;
- Ensaios para a determinação da densidade máxima da mistura teórica para a mistura não compactada.

Esses ensaios foram realizados de acordo com as seguintes normas:

- Norma DNER-ME 053/94 - Misturas betuminosas - percentual de betume;
- Norma DNER-84/95 -Agregado miúdo – determinação e densidade real.
- ABNT 53/2009 - Agregados graúdo - Determinação da massa específica aparente e absorção de água.
- ABNT 248/2003 - Agregados - Determinação da composição granulométrica;
- ABNT 15.619/2012 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas.

5.2.2.1 Determinação do percentual de Betume do CAF

Para determinar o teor de ligante, e posteriormente a granulometria da mistura, foram utilizados procedimentos de extração por centrifugação do ligante do fresado. Para tanto o ligante é separado dos agregados com o uso de solvente.

O Rotarex, figura 22, é um equipamento utilizado para a extração do ligante, conforme proposta pela norma DNER-ME 053/94, cujo objetivo é determinar o teor de ligante em materiais betuminosos. Esse equipamento permite a extração do ligante por banhos de solvente e centrifugação. Para a realização do ensaio foi utilizado o laboratório de transportes do CEFET/MG e o solvente utilizado para a extração foi o solvente percloroetileno. Todas as 3 (três) amostras continham 1000g do fresado.

Figura 22 - Equipamento extrator de betume tipo Rotarex



Fonte: Própria autora

O ensaio foi realizado conforme procedimento relatado na norma DNER-ME 053/94 Misturas betuminosas - percentagem de betume que consiste em:

- As amostras com cerca de 1000g do CAF foram pesadas e arranjadas em recipiente metálico e colocadas em estufa a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por uma hora. Em

seguida a amostra foi retirada e seus grumos foram desfeitos com a utilização de uma espátula;

- As amostras foram classificadas como A1, A2 e A3, as retiradas no km 77+800 e B1, B2 e B3 as retiradas do km 93+000, todas da mesma rodovia – MG-050;
- O percloroetileno foi colocado sobre a amostra até o cobrimento total do CAF e deixado em repouso por 15 minutos;
- A prato foi encaixado sobre o extrator, em seguida colocados os papeis filtros na posição e atarraxadas firmemente as tampas do aparelho;
- Em seguida foi acionado o equipamento centrífugo;
- O processo foi repetido, com o acréscimo de solvente, até feita a observação da saída de cor clara do solvente, na mangueira de saída do extrator;
- Feito isso o material depositado no prato foi retirado da máquina extratora e acomodado em local adequado no laboratório para a secagem ao tempo, ficando em descanso por aproximadamente 24 horas;
- No dia seguinte o material foi pesado e sua massa identificada.

Para o cálculo do teor de betume foi utilizado a equação 1:

$$P = \frac{\text{Peso do betume extraído}}{\text{Peso da amostra total}} \times 100 \quad [1]$$

5.2.2.2 Granulometria do CAF sem ligante

Ao utilizar o CAF em uma nova mistura, é importante conhecer suas características, principalmente a curva granulométrica e o teor de ligante asfáltico. A pesquisa em questão contempla a viabilidade do uso de material 100% fresado para serviço de tapa-buracos sendo assim optou-se pela granulometria sem acréscimo de material virgens de modo não aportar demandas com separação de material.

O material fresado pós extração do ligante foi submetido a ensaios no agregado e posteriormente agrupado para a realização do ensaio de granulometria satisfazendo os requisitos de tolerâncias no que diz respeito às respectivas faixas granulométricas específicas para camadas de rolamento segundo NORMA DNIT 031/2006-ES. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.

Com a amostra de CAF recolhida em campo, coletada segundo as recomendações da norma DNER-PRO-120/97-Coleta de amostras de agregados e ABNT NBR NM 26/ 2001 - Agregados - Amostragem, foi realizada a técnica de amostragem por quarteamento para seleção das amostras a serem ensaiadas. Esta técnica seguiu as premissas de DNER-PRO 199/96 - Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório.

A determinação da composição granulométrica do CAF após extração do ligante foi realizada baseada na norma ABNT NBR NM 248/ 2003 - Agregados – Determinação da composição granulométrica. Foram utilizadas um conjunto de peneiras sucessivas série normal e série intermediária, com as aberturas de malha estabelecidas na tabela 3.

Tabela 3 - Série de peneiras

Série Normal	Série Intermediária
76mm	
-	64mm
-	50mm
38mm	-
-	32mm
-	25mm
19mm	-
-	12,5mm
9,5mm	-
-	6,3mm
4,8mm	-
2,4mm	-
1,2mm	-
0,6mm	-
0,3mm	-
0,15mm	-

Fonte: ABNT NBR NM 248 (2003)

Foi acrescido ao ensaio a peneira nº 200 de abertura de malha de 0,075 mm para efeito comparativo no que diz respeito às faixas granulométricas específicas para camadas de rolamento segundo DNIT, sendo a faixa “C” a utilizada em camada de rolamento para pavimentos.

A partir dos ensaios realizados foi calculado também o módulo de finura do material fresado para cada amostra (A1), (A2) e A3), de acordo com ABNT NBR NM 248/ 2003, que é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado, nas peneiras da série normal, dividido por 100. As peneiras da série normal podem ser visualizadas na tabela 3. Foi estabelecido a massa mínima por amostra de ensaio de 1 kg para cada análise granulométrica realizada.

Os procedimentos para a caracterização dos fresados foram realizados somente pós extração do ligante impregnado nos agregados remanescentes. Esse procedimento justifica se, pois, no material resultante do processo de fresagem são encontrados “falsos” grãos formados pela união dos agregados e ligantes, sendo que para o processo de reciclagem a quente forçosamente esses torrões serão desagregados ao aquecimento em torno de 145° nos procedimentos normais de produção das misturas asfálticas recicladas a quente. Após a extração do ligante, estas partículas se separam, evidenciando a granulometria dos agregados que compunham a mistura original. A figura 23 traz amostras do CAF em estudo, passados na peneira nº 4 separados em graúdos e miúdos após o ensaio de extração de betume.

Figura 23 - Amostra do CAF após a extração do betume



Fonte: Própria autora

A tabela 4 ilustra as curvas granulométricas dos agregados conforme DNIT 031/2006-ES, sendo a faixa “C” a utilizada em camada de rolamento para pavimentos.

Tabela 4 - Especificações granulométricas - DNIT

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: DNIT 031/2006 - ES

5.2.2.3 Determinação da Densidade aparente (Gsb), densidade real (Gsa) e absorção dos agregados

Para a caracterização dos agregados fresados, após a determinação da sua granulometria, foram realizados os ensaios para definições da densidade aparente (Gsb), densidade real (Gsa) e absorção dos agregados. Sendo o material miúdo ensaiado de acordo com a norma DNER-ME 84/95 e o material graúdo conforme a norma ABNT NBR NM 53-2003. Para o material graúdo também foi realizado o ensaio de absorção dos agregados, conforme a mesma norma ABNT NBR NM 53-2003.

$$G_{sa_m} = \frac{b-a}{(d-a) - (c-b)} \quad [2]$$

Onde:

G_{sa_m} = densidade real do agregado miúdo.

b = massa do picnômetro vazio em (g);

a = massa do picnômetro mais amostra em (g);

c = massa do picnômetro mais amostra, mais água em (g);

d = massa do picnômetro cheio de água em (g).

$$G_{sb} = \frac{A}{B-C} \quad [3]$$

Onde:

G_{sb} = densidade aparente do agregado;

A = massa seca do agregado em (g);

B = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca, em (g);

C = massa do agregado submerso (pesagem hidrostática), em (g).

$$G_{sa} = \frac{A}{A-C} \quad [4]$$

Onde:

G_{sa} = densidade real do agregado graúdo.

$$a = \frac{B-A}{A} * 100 \quad [5]$$

Onde:

a = absorção de água do agregado definida em percentual.

Segundo a Norma DNER-ME195/97, o ensaio de absorção determina o aumento de massa do agregado em porcentagem quando este está com seus poros preenchidos de água. Ressalta-se que a capacidade de absorção dos agregados é de fundamental importância para as misturas asfálticas, porque quanto maior for a capacidade

absortiva do agregado, maior a quantidade de ligante que pode ser absorvido, sendo determinante na definição do teor de ligante final da mistura.

5.2.2.4 Determinação da Densidade específica máxima medida (Gmm) – mistura não compactada – procedimento à vácuo

A mistura reciclada na condição solta foi usada para determinação da Densidade Máxima Medida, acondicionada em recipiente específico preenchido com água destilada e submetido à pressão de 30mmHG, num procedimento à vácuo, isso para que os vazios fossem totalmente eliminados, permitindo assim a verificação da densidade máxima quando os vazios são completamente preenchidos.

A obtenção da densidade específica máxima medida (Gmm), também chamada de método Rice, seguiu instruções da norma ABNT NBR 15619. As medidas de Densidade Máxima Medida são utilizadas na determinação do volume de vazios.

Segundo Bernucci et al. (2010), a Gmm além do cálculo do percentual de vazios da mistura asfáltica compactadas, também é indicada para determinação da absorção do ligante pelos agregados, da massa específica do agregado e do teor de asfalto da mistura.

Antunes (2011) afirma que a densidade determinada pelo método Rice, também chamada de densidade máxima medida (DMM), segue as instruções da norma americana ASTM D2041. Sendo calculada pela razão entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, dos vazios impermeáveis, dos vazios permeáveis não preenchidos com asfalto e do total de asfalto. A vantagem do método é a obtenção da densidade da mistura asfáltica sem a necessidade da obtenção das densidades dos seus constituintes separadamente, além de já considerar a absorção de ligante pelos agregados.

Para a determinação da (Gmm) foram utilizados os procedimentos com bomba de vácuo e de acordo com a determinação da norma ABNT 15.619/2016 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas, para todas as misturas recicladas

experimentais estudadas nessa pesquisa. Os resultados foram utilizados no cálculo do percentual de vazios de misturas asfálticas compactadas, absorção de ligante pelos agregados, massa específica efetiva do agregado e teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica.

Foram ensaiadas uma amostra para cada mistura reciclada estudada. Os procedimentos foram os seguintes:

- Primeiramente a amostra com 800g da mistura foi pesada no kitasato, de peso já determinado, e submersa em água à temperatura ambiente em seguida preenchida com água a 25°C até cobrir todo o material.
- Em seguida colocou-se o kitasato sobre um agitador mecânico e aplicou-se uma pressão de vácuo residual de aproximadamente 30 mmHg por um período de 15 minutos, a fim de se expulsar o ar existente entre os agregados recobertos pelo filme de ligante asfáltico.
- Ao fim dos 15 minutos de vácuo completou-se o volume do recipiente com água a temperatura ambiente, evitando a inclusão de ar na amostra.
- O conjunto Kitasato, mistura asfáltica e água foi pesado, e colocado em banho maria para o reestabelecimento e registro da temperatura.

A densidade máxima (Gmm) foi obtida pelas relações entre massas e volumes determinados, de acordo com a equação 6:

$$Gmm = \frac{A}{A+B-C} * 0,9971 \quad [6]$$

Onde:

A = massa da amostra seca ao ar, (g);

B = massa do recipiente com volume completo com água, (g);

C = massa do recipiente com a amostra submersa em água, (g);

0,9971 = densidade da água na temperatura do ensaio (25 °C).

Para a realização do ensaio foram feitas modificações nos procedimentos normativos, sendo o peso das amostras reduzidos para 800g em função à adaptação aos equipamentos e aparelhagem disponíveis no laboratório de pavimentação do CEFET/MG. A figura 24 apresenta algumas das etapas registradas durante o ensaio.

Figura 24 - Etapas do ensaio Gmm



Fonte: Própria autora

5.2.2 Dosagens dos corpos de provas

Dentre os métodos de dosagem de misturas recicladas a quente, destacam-se a metodologia Marshall e a metodologia proposta por Castro Neto (2000) em sua dissertação de mestrado.

A etapas de dosagem para essa pesquisa foram assim determinadas:

- 1) Misturas asfálticas com uso de 100% de material fresado, admitindo ao limite de resistência à tração por compressão diametral estática à 25°C de 0,65 MPA e Estabilidade Marshall mínima de 500Kgf, de acordo com o determinado para camadas de rolamento na norma DNIT 031/2006-ES. Perda de material no ensaio Cântabro atendendo aos requisitos da norma DNER-ES 383/99.
- 2) A quantidade de CAP adicionada de 0,5 e 1% em peso da mistura – 6 a 12g;
- 3) A porcentagem de agente rejuvenescedor adicionado à mistura de 0,5 e 1% em peso da mistura – 6 a 12g;
- 4) Moldagem dos corpos de prova Marshall com as misturas de referência (M1) somente com o CAF sem acréscimo de CAP ou agente rejuvenescedor.
- 5) Moldagem dos demais corpos de prova com acréscimo de agente rejuvenescedor, dosado em % de peso da mistura e dos produtos melhoradores de mistura, como aditivo surfactante – Evothrm e pó de borracha como agregado, sendo a aditivo surfactante dosado em % do peso da mistura e em peso do ligante. O pó de borracha foi dosado em % da mistura. Todas as dosagens podem ser verificadas na tabela 17.

Como na abordagem de Lima (2003) o teor de projeto final foi verificado a partir da variação dos parâmetros mecânicos da mistura atendendo aos requisitos técnicos para concretos asfálticos segundo a normativa do DNIT 031/2006-ES, considerando a quantidade de asfalto remanescente contido no fresado. Desta forma as misturas que se enquadrarem nos parâmetros normativos serão consideradas aptas para indicação de uso como revestimento asfáltico em serviços de tapa-buracos.

O detalhamento das misturas experimentais ensaiadas é demonstrado na tabela 5, com as dosagens e quantidades de corpos de provas determinados para caracterização mecânica de cada mistura asfáltica reciclada.

Tabela 5 - Quantitativos dos corpos de prova moldados para caracterização mecânica das misturas asfálticas recicladas

Quantificação de Corpos de prova – CPs					
Misturas		Ensaio mecânico realizado			
	Dosagens	Estabilidade	Resistência	Câmbrio	Quantidade
01	0,0% CAP	5	5	3	13
02	0,5%CAP	3	3	3	13
03	1,0%CAP	3	3	3	13
04	0,0%CAP+ 0,5% Evotherm	3	3	3	9
05	0,5%CAP+ 0,5% Evotherm	5	5	3	9
06	1,0%CAP+ 0,5% Evotherm	5	5	3	9
07	0,0%CAP+0,5%AR	3	3	3	9
08	0,5%CAP+0,5%AR	3	3	3	13
09	1,0%CAP+0,5%AR	3	5	3	13
10	0,0% CAP+1,0%B+1%AR	5	5	3	9
11	0,5%CAP+1,0%B+1%AR	5	5	3	9
12	1,0%CAP+1,0%B+1%AR	3	3	3	9
13	0,0%CAP+ 2%B+0,5%AR	5	3	3	9
14	0,5%CAP+ 2%B+0,5%AR	3	3	3	9
15	1,0%CAP+ 2%B+0,5%AR	5	5	3	9
16	0,0%CAP+2,0%B	3	3	3	9
17	0,5%CAP+2,0%B	3	5	3	9
18	1,0%CAP+2,0%B	3	5	3	9
19	0,0%CAP+0,306g Evotherm	3	3	3	9
20	0,5%CAP+0,336g Evotherm	3	3	3	9
21	1,0%CAP+0,366g Evotherm	3	3	3	9
Total de corpos de prova					209

Fonte: Própria autora

As misturas M7, M8 e M9 foram dosadas com adição de aditivo surfactante em peso da mistura. As misturas M19, M20 e M21 foram dosadas em peso do ligante ao teor de 0,0255%, 0,0280% e 0,0305% respectivamente, equivalente em peso 0,306g, 0,336g e 0,366g de aditivo acrescentado na mesma ordem.

Nesse estudo foi considerado que 100% do ligante foi remobilizado, ou seja, que o processo de difusão foi concluído. A mistura asfáltica reciclada foi produzida a e 145°C no limite inferior da reciclagem a quente.

A escolha da temperatura de produção das amostras foi baseada na pesquisa de Silva (2011) onde foi verificado as temperaturas de produção das misturas totalmente recicladas, e duas misturas com adição de dois tipos de AR em cada uma, sendo o teor de ligante recuperado de 5,1 %, vários ensaios de compatibilidade foram realizados a diferentes temperaturas, no compactador de impacto Marshall. Os resultados mostraram que a temperatura de 145°C foi selecionada para produzir esta mistura como sendo a temperatura mínima à qual o CAF deve ser aquecido para assegurar uma trabalhabilidade adequada.

As moldagens dos corpos de prova foram realizadas de acordo com a metodologia Marshall especificado pelo DNER-ME 43/64, moldados com aproximadamente 1200 g de massa total cada, altura 63 mm e diâmetro de 100 mm, empregando-se 75 golpes por face do corpo de prova na prensa Marshall. Desta forma foram ensaiados no mínimo 3 (três) CPs para cada teor de betume e variações de produto, conforme tabela 5.

Os equipamentos e materiais utilizados foram:

- Forno para pré-aquecer a mistura, aquecer e manter aquecidas as espátulas, colheres e demais ferramentas;
- Termômetro; Fogareiro; Balança;
- Conjunto de moldes, prensa de compactação e extrator de moldes.

Os procedimentos são descritos da seguinte forma:

- Pré-aquecimento do fresado em forno a 110°C por cerca de 10 minutos para amolecimento dos grumos.
- Aquecimento e homogeneização do fresado a 145°C em panela com fogareiro;
- Retirada do molde do forno e preenchimento com a amostra, seguido de ajuste com uma espátula (nas bordas);
- Fixação do molde no compactador Marshall e aplicação de 75 golpes com o martelo de compactação, nas duas faces;
- Retirada do molde do compactador e posicionamento em local seco e arejado para resfriamento;
- Remoção dos CP's com a utilização de extrator específico e registro das dimensões.

A figura 25 mostra etapas da moldagem dos CPs na metodologia Marshall.

Figura 25 - Etapas e equipamentos da moldagem dos CPs



Fonte: Própria autora

A figura 26 mostra os moldes ao fundo e os corpos de prova moldados na metodologia Marshall à frente.

Figura 26 - Corpos de prova recém moldados



Fonte: Própria autora

5.2.3 Determinação das propriedades volumétricas

De acordo com ANTT (2014), a verificação dos parâmetros volumétricos de misturas asfálticas compactadas em laboratório é necessária para um indicativo do desempenho provável que estas misturas apresentarão posteriormente em campo.

Após os resultados dos ensaios realizados no CAF, a determinação da Gmm e moldagem dos corpos de prova, foram então calculados os principais parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas: massa específica aparente (G_{mb}), volume de vazios (V_v), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume vazio (RBV).

A massa específica aparente da mistura asfáltica compactada (G_{mb}) de acordo com a norma com os procedimentos da norma DNER-117/94, a qual é definida pela relação entre a massa do corpo de prova seco (M_s) e o volume deste corpo de prova, dado pela seguinte razão:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_s - M_{s\ sub}} \quad [7]$$

Onde:

M_s = Massa seca do corpo de prova compactado, em g;

Ms sub = Massa seca do corpo de prova imerso em água, em g;

0,9971 = Massa específica da água na temperatura do ensaio a 25°C, (g/cm³).

A partir da densidade máxima da mistura (Gmm) já calculada foram calculados os demais parâmetros volumétricos. Sejam eles:

(Vv) Volume de Vazios:

$$Vv = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} * 100 \quad [8]$$

(VCB) Vazios cheios de Betume:

$$VCB = \frac{\%CAP}{capp} * Gmb \quad [9]$$

(VAM) Vazios do agregado mineral:

$$VAM = Vv + VCB \quad [10]$$

(RBV) relação betume/vazios:

$$RBV = \frac{VAM - Vv}{VAM} * 100 \quad [11]$$

Onde:

Gmb = massa específica aparente do CP, (g/Cm³);

capp = peso específico do CAP, (1,025g/Cm³);

%CAP= Percentual de CAP na mistura.

Antes da realização do ensaio de desgaste cântabro foram feitos os ensaios de densidade massa específica aparente (Gmb) nos mesmos corpos de prova.

5.2.4 Caracterização mecânica das misturas asfálticas recicladas

A avaliação de desempenho de misturas asfálticas recicladas foi realizada através do ensaio de resistência a tração por compressão diametral, do ensaio empírico de Estabilidade Marshall que correlaciona os seus resultados de laboratório com o desempenho de campo (Lima, 2003), e ainda com os testes de desgaste abrasão – Cântabro (Aguilar, 2016).

A reciclagem do pavimento com as misturas pesquisadas foi avaliada quanto ao desempenho requerido com os mesmos critérios das misturas virgens, tendo a finalidade de verificar possíveis alterações de comportamentos mecânicos em laboratório e definir os melhores parâmetros de projeto em termos de viabilidade técnica, garantindo assim sua aplicabilidade nas obras viárias de manutenção.

5.2.2.5 Ensaio de Resistência a Tração - Compressão diametral

O ensaio foi realizado conforme descrito na norma DNIT 136/2010 – ME “Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração (RT) por compressão diametral – Método de ensaio.” Para o controle da qualidade da mistura, a especificação DNIT 031/2006-ES estabelece que seja realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Os ensaios de RT foram realizados nos corpos de prova moldados pela metodologia Marshall.

A carga é aplicada através de frisos metálicos de 12,7mm progressivamente, em prensa com velocidade do êmbolo de $(0,8 \pm 0,1)$ mm/s até a ruptura do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical, havendo a separação em duas metades do corpo de prova. Os corpos de prova foram mantidos e ensaiados à temperatura de 25°C.

Para o ensaio foram efetuadas três medições no corpo de prova com auxílio do paquímetro em posições equidistantes para a determinação do seu diâmetro e altura média. Com o valor obtido da carga de ruptura no microcomputador foi possível calcular a resistência a tração através da expressão:

$$\delta R = \frac{2F}{100\mu\pi DH} \quad [12]$$

Onde:

δR = resistência a tração, em MPa;

F= carga de ruptura, em N;

D= diâmetro do corpo de prova, em cm;

H = altura do corpo de prova, em cm.

A figura 27 ilustra o equipamento utilizado do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e materiais do DET/CEFET/MG.

Figura 27 - Foto do equipamento utilizado para o ensaio RT



Fonte: Própria autora

5.2.2.6 Ensaio de Estabilidade Marshall

O ensaio foi realizado conforme os procedimentos relatados na norma DNER-ME 043/95 “Pavimentação asfáltica - Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Com determinação da estabilidade e fluência de misturas betuminosas usinadas a quente utilizando o equipamento Prensa Marshall elétrica digital.

O equipamento (Solocap, 2018) registra a carga aplicada através do conjunto Célula de Carga e Leitor digital com resolução de 0,001mm. Permite um registro completo e permanente durante a fase do ensaio. O acionamento mecânico é através de motor elétrico e o retorno do pistão é por inversão de acionamento elétrico com parada

através de interruptor de fim de curso. A figura 28 mostra o equipamento disponível no Laboratório de Tecnologia dos Pavimentos e Ferrovias do DET – Departamento de Transportes do CEFET/MG onde foi realizado os ensaios de Estabilidade e Fluência Marshall.

Figura 28 - Foto do equipamento Prensa Marshall



Fonte: Própria autora

O ensaio de estabilidade Marshall é realizado em corpos de prova dosados e compactados de acordo com a metodologia Marshall. A carga de compressão é aplicada através de cabeçotes com velocidade de carregamento de 5 cm por minuto. Esse ensaio teve a temperatura de ensaio adaptada para 40°C em função do ponto de amolecimento do CAP indicado no estudo.

Nascimento (2011) confirma o princípio que o resultado deste ensaio é a estabilidade (carga máxima em que o corpo de prova rompe) e a fluência dada pelo deslocamento vertical total do corpo de prova. A mistura asfáltica é adequada para pavimentação se possuir Estabilidade Marshall mínima (75 golpes em cada face) de 500 Kgf, (DNIT 031/2006-ES).

A estabilidade Marshall é um dos parâmetros mais usados, no Brasil, para dosagem e controle de qualidade de misturas asfálticas. O equipamento é de uso comum nos laboratórios de obras e considerado barato e de fácil realização dos ensaios. Vale ressaltar, que para alguns pesquisadores os resultados desse ensaio não são confiáveis pela grande dispersão dos seus resultados.

5.2.2.7 Ensaio de Desgaste Cântabro

O ensaio de Resistência ao Desgaste Cântabro consiste em determinar a resistência à desagregação do pavimento baseado na análise das massas submetidas ao aparelho de Abrasão Los Angeles. A norma brasileira que definem a metodologia e utilizada nessa pesquisa foi DNER - ME 383/99 - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cântabro.

Segundo Bernucci et al. (2010) desgaste por abrasão simula o arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito do pneu. Como já anunciado por Aguilar (2016) como não existe norma específica para misturas asfálticas reciclados a quente para perda de material esse ensaio pode ser estendido para outros tipos de mistura conforme ABNT-NBR 15.140/2004.

Para realização do ensaio todas as amostras foram previamente condicionadas à temperatura de 25°C, por no mínimo 24 horas. Conforme a norma DNER - ME 383/99, os resultados não podem diferir mais de 20% de uma amostra para a sua média, para que o ensaio seja aceito.

A aparelhagem necessária:

- Máquina Los Angeles, sem a respectiva carga abrasiva (esferas de aço);
- Balança com capacidade de 5 kg, sensível a 1,0g;
- Corpo de prova obtido pela metodologia Marshall.

Procedimento:

- Pesagem do CP Marshall;
- Colocação do CP no aparelho de abrasão de Los Angeles;
- Na temperatura de 25°C, efetuar 300 revoluções na velocidade de 30 rpm;

- Retirada e pesagem do CP.

Cálculo:

$$D = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \times 100 \quad [13]$$

Sendo:

- D= valor do desgaste em %;
- M₁= massa do CP antes do ensaio;
- M₂= massa do CP depois do ensaio.

A figura 29 ilustra o equipamento utilizado para a realização do ensaio.

Figura 29 - Foto do equipamento de Abrasão Los Angeles



Fonte: Própria autora

5.2.2.8 Ensaio de Módulo de Resiliência

Os ensaios de Módulo de Resiliência foram realizados no Laboratório de Asfalto e Ferrovias da UFOP. A figura 30 mostra uma foto do equipamento utilizado, Sistema SIGEO. Esses ensaios foram realizados em conformidade com os procedimentos da norma DNIT 135/2018 – ME, conhecido como o ensaio de tração indireta ou compressão diametral. Os ensaios de MR foram realizados nos corpos de prova moldados pela metodologia Marshall (diâmetro de 100 mm e altura de 63 mm aproximadamente).

Figura 30 - Foto do equipamento utilizado para o ensaio MR



Fonte: Própria autora

Para esse ensaio foram escolhidas as misturas otimizadas que apresentaram os melhores resultados nos ensaios de Estabilidade e Fluência Marshall, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Desgaste Cântabro. Sendo assim, para avaliação das características mecânicas das misturas recicladas por meio do ensaio de módulo de resiliência foram escolhidas as misturas M1, M2, M8, M17 e M20, conforme dosagens reapresentadas na tabela 6.

Tabela 6 - Quantitativos dos corpos de prova moldados para caracterização mecânica das misturas asfálticas recicladas - Ensaio de Módulo de Resiliência

Misturas escolhidas para ensaio de Módulo de Resiliência		
Misturas	Dosagens	CPs
M1	100%fresado	3
M2	100%fresado+0,5%CAP	3
M8	100%fresado+0,5%CAP+0,5%AR	3
M17	100%fresado+0,5%CAP+2,0%Borracha	3
M20	100%fresado+0,5%CAP+0,336g Evotherm	3
Total de corpos de provas		15

Fonte: Própria autora

Os corpos de prova equivalentes às misturas escolhidas para o ensaio de MR são apresentados na figura 31.

Figura 31 - CPs utilizados no ensaio de MR



Fonte: Própria autora

Para o ensaio de módulo de resiliência foram efetuadas quatro medições no corpo de prova com auxílio do paquímetro em posições equidistantes tanto para a determinação do seu diâmetro como para a altura média. Os CPs foram armazenados por um período de 4 dias em temperatura inferior a 30°C e antes da realização do ensaio de MR foram previamente acondicionados por um período de 4 horas à

temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. A figura 32 apresenta as condições de controle de temperatura do ensaio.

Figura 32 - Foto do acondicionamento térmico dos CPs a 25°C



Fonte: Própria autora

Segundo Bertollo (2002) as tensões aplicadas são bem abaixo das tensões de ruptura estática do material, já que se pretende permanecer no regime elástico. Dessa forma conclui-se que esse ensaio não é destrutivo podendo as amostras serem reutilizadas em outros ensaios.

Figura 33 - Foto do posicionamento do CP e do LVDT para o ensaio MR



Fonte: Própria autora

Passado o período de acondicionamento térmico os CPs foram submetidos ao dispositivo de carregamento, com valor de aproximadamente 15% da força máxima encontrada no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Cada corpo de prova foi alinhado e centralizado verticalmente ao longo de duas diretrizes opostas, entre os frisos de cargas, seguido do posicionamento do LVDT externo preso ao corpo de prova com auxílio do quadro suporte de fixação. A carga foi aplicada durante um tempo de 0,1 s e o intervalo de repouso entre duas aplicações consecutivas foi de 0,9s. A figura 33 mostra o arranjo do LVDT para medição da deformabilidade resiliente ou elástica (Δ) ao longo do diâmetro horizontal, perpendicular à carga (F) aplicada repetidamente e registro dos sinais no microcomputador. O ensaio foi realizado à temperatura de 25°C.

O Microcomputador possui um software de aquisição de dados capaz de receber os sinais do LVDT e calcular os valores dos módulos de resiliência para cada corpo de prova ensaiado, usando a expressão:

$$MR = \frac{F}{100\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad [14]$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, em MPa;

F= carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo, em N;

Δ = deformação elástica ou resiliente registrada no microcomputador, para aplicações de carga (F), em cm;

H = altura do corpo de prova, em cm.

μ = coeficiente de Poisson. Valor de 0,30 recomendado pela norma.

A figura 34 mostra um exemplo do módulo de resiliencia registardos na tela do computador além da carga e deslocamentos totais para cada corpo de prova ensaiado.

Figura 34 - Foto do posicionamento do CP e do LVDT para o ensaio MR



Fonte: Própria autora

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física dos materiais constituintes do CAF e dos ensaios mecânicos realizados nos corpos de prova moldados pela metodologia Marshall para avaliação do comportamento físico-químico e mecânico das misturas asfálticas recicladas.

6.1 Caracterização dos materiais do CAF

De acordo com o planejamento experimental serão apresentados os resultados do ensaio de Extração de Betume, da granulometria do CAF pós extração do ligante e os resultados da densidade aparente (G_{sb}), densidade real (G_{sa}) e absorção dos agregados.

6.1.1 Ensaio Extração de Betume

O ensaio de Extração de Betume possibilitou a determinação do percentual de ligante no fresado (CAF). Para esse fim foi utilizado o percloroetileno como solvente. Sendo apresentado os resultados na tabela 7 para as amostras ensaiadas com o CAF retirados do km 78+800 e no km 93+000.

Tabela 7 - Valores obtidos do ensaio de Extração de betume

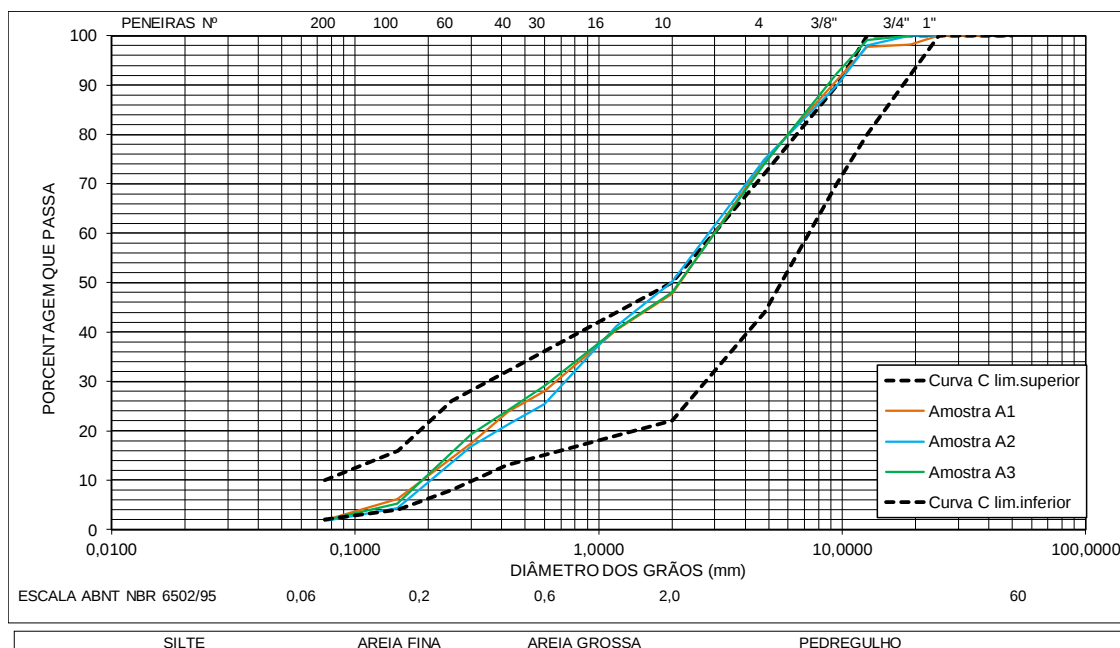
Amostras	1 (%)	2 (%)	3 (%)	Média (%)	Desvio Padrão
Km 78+800	4,50	4,30	6,10	5,06	0,31
Km 93+000	5,60	5,20	5,00	5,26	0,31

Fonte: Própria autora

6.1.2 Ensaio de granulometria do CAF sem ligante

As curvas granulométricas resultantes da caracterização física dos agregados recuperados, CAF, recolhidos no km 77+800 são apresentadas na figura 35, e os matérias recolhidos no km 93+000 são apresentados na figura 36.

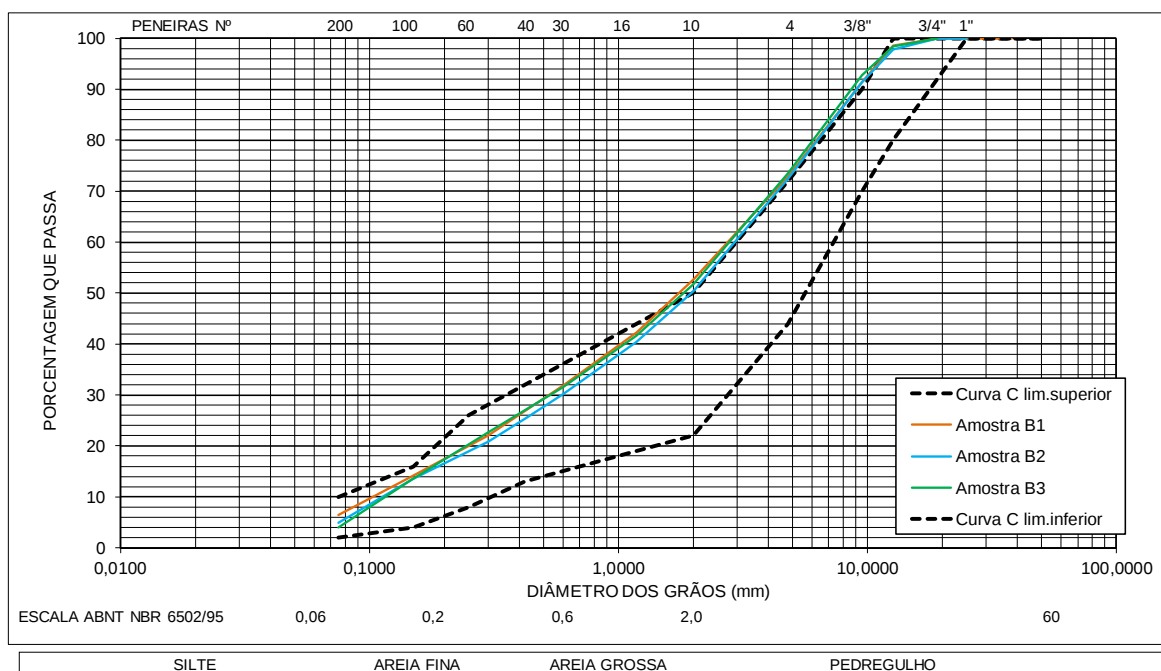
Figura 35 - Curva granulométrica dos Materiais (A1), (A2) e (A3) – km 78+800



Fonte: Própria autora

As amostras de material fresado (A1), (A2) e (A3), como pode ser observado na figura 35, apresentaram resultados satisfatórios dentro dos limites requeridos nas especificações da faixa “C” de trabalho do DNIT, NORMA DNIT 031/2006 – ES, para dosagens de misturas asfálticas com a finalidade de revestimento pavimentado.

Figura 36 - Curva granulométrica dos Materiais (B1), (B2) e (B3) – km 93+000



Fonte: Própria autora

As amostras de material fresado (B1), (B2) e (B3), observados na figura 36, também apresentaram resultados satisfatórios dentro dos limites requeridos nas especificações da faixa “C” de trabalho do DNIT, NORMA DNIT 031/2006 – ES, como era de se esperar por serem pontos próximos da mesma rodovia.

Não foram identificados excessos de material fino no fresado estudado e por isso não foram necessários ajustes como acréscimo de material virgem ou mesmo retirada de parte dos fresados de granulometria fina.

Conforme descrito por Oliveira (2013) existe a propensão do material fresado ter sua granulometria diminuída, isso se deve ao processo de fresagem pela quebra dos agregados através do uso da fresadora. O que depende do equipamento e velocidade de processamento da fresagem. O material fresado usado nessa pesquisa é proveniente da utilização da fresadora de asfalto Wirtgen W 1000L.

6.1.3 Determinação da densidade aparente (Gsb), densidade real (Gsa) e absorção dos agregados.

Foram determinadas a Densidade Aparente (Gsb) e Densidade Real (Gsa) do material fresado pós análise granulométrica fracionada em grãos e miúdos. Sendo o material miúdo ensaiado de acordo com a norma DNER-ME 84/95 e o material grão conforme a norma ABNT NBR NM 53/2003. Para o material grão também foi realizado o ensaio de absorção dos agregados conforme a mesma norma ABNT NBR NM 53/2003. Os valores médios para a amostragem realizada no km 78+800 foram calculados e estão apresentados na tabela 8 a seguir:

Tabela 8 - Resultados ensaios Gsb, Gsa e Absorção - km 78+800

Agregados Recuperados			
Grão			Miúdo
Absorção (%)	Densidade Aparente – Gsb (g/cm ³)	Densidade Real – Gsa (g/cm ³)	Densidade Real – Gsa (g/cm ³)
0,58	2,54	2,58	2,51

Fonte: Própria autora

Da mesma forma foram os valores médios para a amostragem realizada no km 93+000 foram calculados e estão apresentados na tabela 9:

Tabela 9 - Resultados ensaios Gsb, Gsa e Absorção - km 93+000

Agregados Recuperados			
Graúdo			Miúdo
Absorção (%)	Densidade Aparente – Gsb (g/cm ³)	Densidade Real – Gsa (g/cm ³)	Densidade Real – Gsa (g/cm ³)
1,06	2,53	2,65	2,44

Fonte: Própria autora

Segundo Gennesseaux 2015, um dos fatores do endurecimento dos revestimentos asfálticos: a remoção de óleos do ligante é devido a absorção seletiva nos poros de agregados.

6.2 Propriedades Volumétricas da Mistura

Os resultados obtidos com os ensaios realizados com as amostras das misturas asfálticas recicladas experimentais não compactadas para a densidade máxima medida (Gmm) foram determinadas conforme norma ABNT 15.619/2012. Esses dados serão utilizados para determinação das propriedades volumétricas das misturas compactadas.

Os resultados dos ensaios realizados para as propriedades volumétricas das misturas compactadas e moldadas, bem como a densidade específica máxima medida (Gmm), massa específica aparente (Gmb), volume de vazios (Vv), vazios do agregado mineral (VAM) e a relação betume vazio (RBV) são indicados nas tabelas 10 a 16, sendo as 3 (três) misturas de cada tabela agrupadas por tipo de produto adicionado variando o uso do CAP em 0,0%, 0,5% e 1,0%. Os valores que estão marcados de vermelhos estão fora da faixa de atendimento normativo.

A tabela 10 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M1, M2 e M3 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, sem adição de produto.

Tabela 10 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP

Parâmetro	Norma	Misturas			Limites
		01	02	03	
Gmm (g/cm³)	ABNT 15.619/2012	2,65	2,50	2,35	-
Gmb (g/cm³)	DNER-117/94	2,29	2,37	2,33	-
Ligante Total (%)	DNIT031/2006	5,06	5,56	6,06	4,5 - 9
Vv (%)	DNIT031/2006	13,57	5,38	0,84	3 - 5
VCB (%)	-	11,40	12,92	17,56	-
VAM (%)	DNIT031/2006	24,96	18,31	18,40	>18
RBV (%)	DNIT031/2006	45,67	70,66	95,54	75 - 82

Fonte: Própria autora

Os resultados da segunda sequência de ensaios com as misturas M4, M5 e M6 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de aditivo surfactante são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP com adição de aditivo surfactante - 0,5% da mistura

Parâmetro	Norma	Misturas			Limites
		04	05	06	
Gmm (g/cm³)	ABNT 15.619/2012	2,45	2,42	2,52	-
Gmb (g/cm³)	DNER-117/94	2,35	2,37	2,39	-
Ligante Total (%)	DNIT031/2006	5,06	5,56	6,06	4,5 - 9
Vv (%)	DNIT031/2006	6,61	2,18	2,51	3 - 5
VCB (%)	-	11,69	15,42	16,94	-
VAM (%)	DNIT031/2006	18,31	15,42	16,94	>18
RBV (%)	DNIT031/2006	63,87	85,90	85,62	75 - 82

Fonte: Própria autora

Os resultados da terceira sequência de ensaios com as misturas M7, M8 e M9 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 0,5% de agente rejuvenescedor são apresentados na tabela 12.

Tabela 12 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP com adição de AR

Parâmetro	Norma	Misturas			Limites
		07	08	09	
Gmm (g/cm³)	ABNT 15.619/2012	2,47	2,44	2,44	-
Gmb (g/cm³)	DNER-117/94	2,35	2,36	2,36	-
Ligante Total (%)	DNIT031/2006	5,06	5,56	6,06	4,5 - 9
Vv (%)	DNIT031/2006	4,96	3,39	3,31	3 - 5
VCB (%)	-	11,68	13,17	14,33	-
VAM (%)	DNIT031/2006	16,64	16,56	17,64	>18
RBV (%)	DNIT031/2006	70,25	79,60	81,56	75 - 82

Fonte: Própria autora

Os resultados da quarta sequência de ensaios com as misturas M10, M11 e M12 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 1,0% de pó de borracha fina e mais 1,0% agente rejuvenescedor são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP com adição de Borracha e AR

Parâmetro	Norma	Misturas			Limites
		10	11	12	
Gmm (g/cm³)	ABNT 15.619/2012	2,43	2,36	2,35	-
Gmb (g/cm³)	DNER-117/94	2,24	2,31	2,33	-
Ligante Total (%)	DNIT031/2006	5,06	5,56	6,06	4,5 - 9
Vv (%)	DNIT031/2006	7,64	2,29	0,72	3 - 5
VCB (%)	-	11,08	11,38	11,52	-
VAM (%)	DNIT031/2006	18,72	13,68	12,24	>18
RBV (%)	DNIT031/2006	59,23	83,31	94,08	75 - 82

Fonte: Própria autora

Os resultados da quinta sequência de ensaios com as misturas M13, M14 e M15 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidas de 2,0% de pó de borracha fina e mais 0,5% agente rejuvenescedor são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP com adição de Borracha e AR

Parâmetro	Norma	Misturas			Limites
		13	14	15	
Gmm (g/cm³)	ABNT 15.619/2012	2,38	2,38	2,33	-
Gmb (g/cm³)	DNER-117/94	2,21	2,24	2,24	-
Ligante Total (%)	DNIT031/2006	5,06	5,56	6,06	4,5 - 9
Vv (%)	DNIT031/2006	7,12	5,69	3,81	3 - 5
VCB (%)	-	11,00	11,64	13,20	-
VAM (%)	DNIT031/2006	18,12	17,33	17,42	>18
RBV (%)	DNIT031/2006	60,72	67,12	78,29	75 - 82

Fonte: Própria autora

Os resultados da sexta sequência de ensaios com as misturas M16, M17 e M18 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 2,0% de pó de borracha fina são apresentados na tabela 15.

Tabela 15 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP com adição de Borracha

Parâmetro	Norma	Misturas			Limites
		16	17	18	
Gmm (g/cm³)	ABNT 15.619/2012	2,38	2,35	2,37	-
Gmb (g/cm³)	DNER-117/94	2,20	2,18	2,25	-
Ligante Total (%)	DNIT031/2006	5,06	5,56	6,06	4,5 - 9
Vv (%)	DNIT031/2006	7,55	7,63	4,93	3 - 5
VCB (%)	-	10,95	12,15	13,69	-
VAM (%)	DNIT031/2006	18,50	19,92	16,14	>18
RBV (%)	DNIT031/2006	59,26	61,03	69,54	75 - 82

Fonte: Própria autora

Os resultados da sétima sequência de ensaios com as misturas M19, M20 e M21 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de aditivo surfactante – em % do ligante são apresentados na tabela 16.

Tabela 16 - Propriedades volumétricas - Uso do CAP com adição de aditivo surfactante - 0,03% do ligante

Parâmetro	Norma	Misturas			Limites
		19	20	21	
Gmm (g/cm³)	ABNT 15.619/2012	2,49	2,51	2,43	-
Gmb (g/cm³)	DNER-117/94	2,32	2,38	2,37	-
Ligante Total (%)	DNIT031/2006	5,06	5,56	6,06	4,5 - 9
Vv (%)	DNIT031/2006	7,03	5,13	2,61	3 - 5
VCB (%)	-	11,30	11,61	21,54	-
VAM (%)	DNIT031/2006	18,33	16,75	14,14	>18
RBV (%)	DNIT031/2006	61,65	69,32	81,70	75 - 82

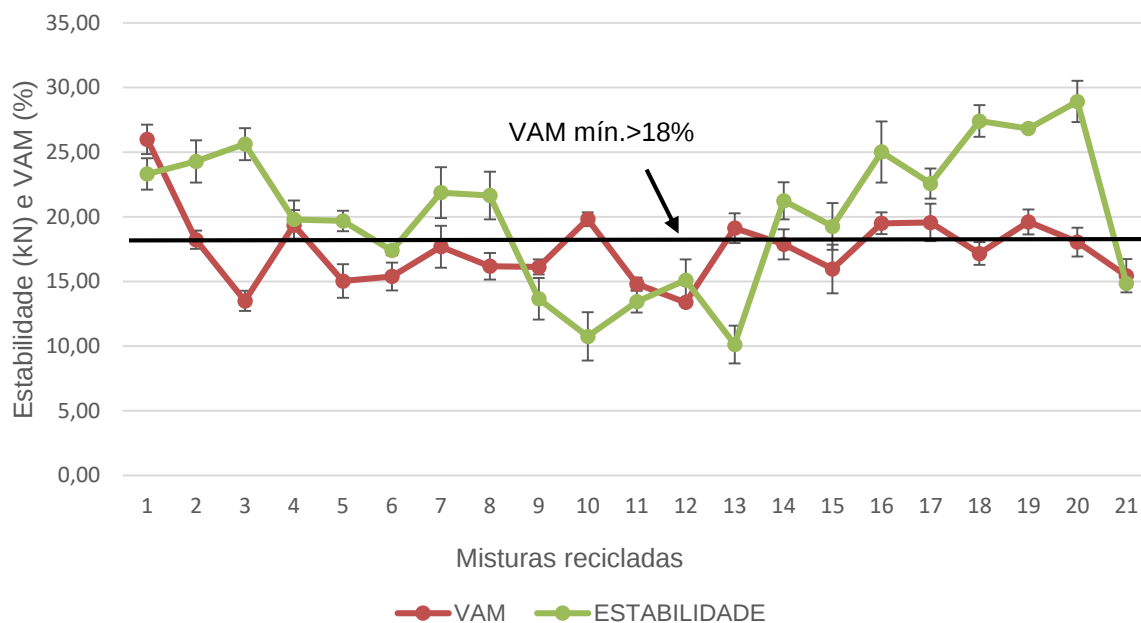
Fonte: Própria autora

Analisando os resultados obtidos para as propriedades volumétrica das misturas é observado alguns valores fora dos limites normativos para misturas asfálticas

O RBV (relação betume/vazios) é a percentagem de vazios intergranulares preenchidos por asfalto e serve para garantir uma qualidade razoável de ligante preenchendo os vazios do agregado mineral; valores muito baixos comprometem a durabilidade da mistura e muito altos a estabilidade, SPECHT (2004a).

Esse mesmo autor cita que o Volume de Vazios (Vv) é a propriedade volumétrica mais importante do concreto asfáltico; sempre são necessários vazios abertos dentro da mistura compactada para permitir a expansão térmica dos ligantes e suportar a leve compactação causada pelo tráfego. Volumes de vazios muito baixos (menores que 3%) comprometem o desempenho das misturas quanto ao afundamento em trilha de rodas. Volumes de vazios muito altos (maiores que 8%) comprometem a durabilidade (SPECHT, 2004a). Segundo Bernucci et al. (2010) quando não acontece certo volume de vazios com ar, as misturas asfálticas deixam de ser estáveis ao tráfego e podem se deformar por fluência. A figura 37 mostra a relação entre o Volume de Vazios do Agregado Mineral (VAM) e a Estabilidade Marshall obtida dos respectivos ensaios.

Figura 37 - Volume do Agregado Mineral (VAM) em função da Estabilidade de cada mistura estudada



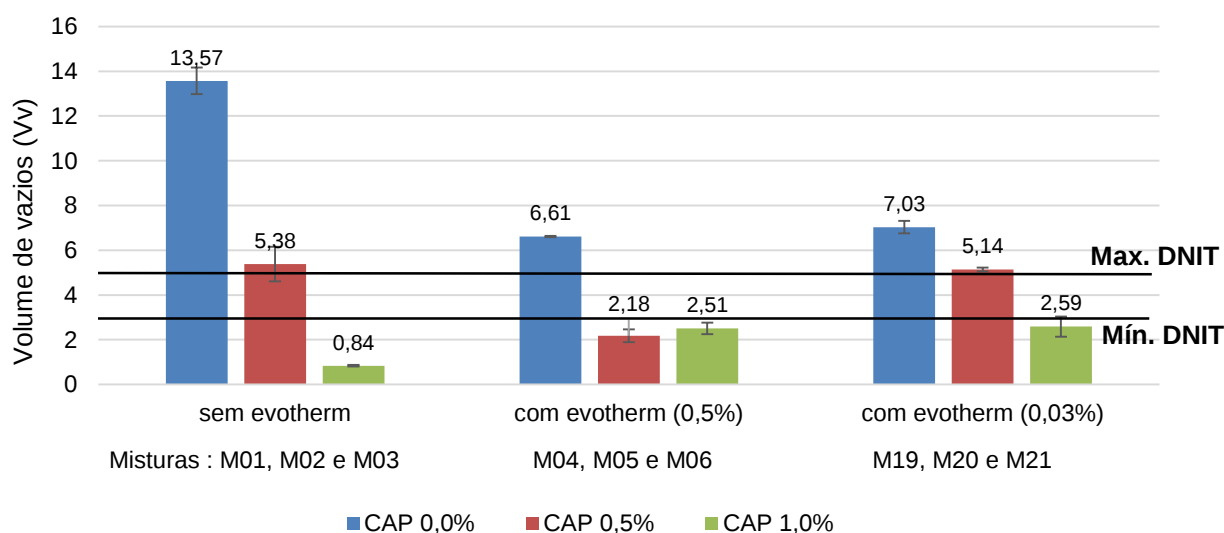
Fonte: Própria autora

O Vazios do agregado mineral (VAM) é representado pelo volume total de vazios dado pela soma dos vazios da mistura mais o volume ocupado pelo asfalto, ou seja, é o espaço entre os grãos do esqueleto mineral. De acordo com Specht (2004a) valores muito reduzidos de VAM remetem a teores muito baixos de ligante que pode comprometer o desempenho à fadiga e a durabilidade das misturas. Valores mais altos podem levar a desarrancho estrutural dos agregados e consequente perda da resistência ao cisalhamento.

Os resultados mostram que algumas misturas não atenderam ao quesito VAM. A mistura M12 apresentou o menor valor, mostrando que a adição de CAP, mais AR e pó de borracha apesar de apresentar um bom somatório de aglomerantes reduziu o VAM para 13,38%, considerando o ensaio realizado com 3 (três) CPs a um desvio padrão de 1,11. Como a mistura M10 alcançou esse quesito (VAM = 19,81%) é possível inferir que o pó de borracha e o acréscimo de CAP interfere nessa relação com a redução do volume de vazios, essa relação é importante para a escolha da mistura reciclada de melhor qualidade.

A trabalhabilidade das misturas pode ser observada por meio do volume de vazios atingido por corpos de prova compactados. De acordo com Mocelim (2015) não existem normas que apontem um método de medição direta da trabalhabilidade em misturas asfálticas, porém, a partir de ensaios de compactação padronizados, pode se inferir sobre o volume de vazios que o material atinge, podendo variar de acordo com a aplicação, sendo considerado a trabalhabilidade adequada. Nesse trabalho consideramos a análise da trabalhabilidade das misturas asfálticas recicladas a partir das adições de aditivo surfactante. A figura 38 retrata a influência do aditivo surfactante Evotherm P25 nas misturas:

Figura 38 - Volume de vazios em função da adição de aditivo surfactante



Fonte: Própria autora

É possível observar a atuação do aditivo na redução do volume de vazios. Essa situação é bem marcante nas misturas M1, M4 e M19, onde não há acréscimo de CAP virgem. As misturas com aditivo apresentam volume de vazios sempre inferiores quando comparado às misturas sem o aditivo, mostrando uma compactabilidade maior, devido ao acréscimo de lubrificação conferido pelo surfactante (MOCELIM, 2015). As misturas com Vv menor que os recomendados (3 a 5%) podem ter sua qualidade melhorada com acréscimo de material filer mineral (DER/PR ES-P 28/05, 2007). Motta (2011) acrescenta que as misturas que apresentaram um volume de vazios muito alto, pode ser que essas misturas foram produzidas com temperaturas muito baixas.

6.3 Ensaios nos corpos de prova – caracterização mecânica

Os ensaios realizados para caracterização mecânica das misturas asfálticas recicladas foram: resistência a tração por compressão diametral; Estabilidade e Fluência Marshall; o ensaio de desgaste abrasão Cântabro; e módulo de resiliência para algumas misturas.

Vale esclarecer que as misturas com adição do aditivo surfactante Evotherm (M19 a M21) foram programadas com o intuito de confrontar os resultados apresentados para as misturas M4 a M6, visto que o acréscimo de aditivo surfactante não deveria alterar severamente as propriedades mecânicas das misturas, o que ocorreu com as misturas M4 a M6, esse fato pode ter ocorrido pelo processo de preparação das misturas ou pelo excesso de aditivo. Desta forma foi refeito os ensaios com adição de aditivo Evotherm, ao teor de 0,5% do ligante total da mistura (NYS/DOT, 2013), perfazendo adições de 0,306g, 0,336g e 0,366g para as misturas M19 a M21, respectivamente. Destaca-se que a quantidade de ligante total da mistura é um ponto de incerteza nas misturas asfálticas recicladas. Motta (2011) acrescenta que o controle da temperatura de produção é essencial para o sucesso das misturas asfálticas com redução de temperatura pois afeta suas propriedades mecânicas.

A incorporação do aditivo em laboratório foi realizada conforme procedimentos descritos por Motta (2011) onde o aditivo foi incorporado antes do processo de usinagem, após etapa de aquecimento do ligante. Ou seja, depois do ligante ser aquecido à temperatura de 145°C o aditivo introduzido foi misturado por um período de 15 min, sob um banho térmico para manutenção da temperatura com agitação manual.

6.3.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Resistência à Tração (RT) por compressão diametral, foram determinadas de acordo com a norma DNER-ME 136/2010 para as misturas experimentais recicladas M1 a M21. Os resultados para cada mistura asfáltica estudada são apresentados nas tabelas 17 a 23, sendo as misturas de cada tabela agrupadas por tipo de produto acrescentado à mistura variando o uso do CAP em 0,0%, 0,5% e 1,0%. Foi observada

uma redução significativa com a adição de aditivo Evotherm, misturas M4 a M6, relatando o excesso de aditivo nas misturas.

A tabela 17 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M1, M2 e M3 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente.

Tabela 17 - Resistencia à Tração - Uso do CAP

Misturas		Teor de ligante projeto (%)	Resistência à Tração (MPa)	Desvio Padrão	Valor mínimo DNIT 031/2006 (MPa)
01	0,0% CAP (só fresado)	5,06	2,46	0,19	0,65
02	0,5% CAP	5,56	2,45	0,16	
03	1,0% CAP	6,06	1,92	0,12	

Fonte: Própria autora

Os resultados da segunda sequência de ensaios com as misturas M4, M5 e M6 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 0,5% de aditivo surfactante são apresentados na tabela 18.

Tabela 18 - Resistencia à Tração - Uso do CAP com adição de aditivo surfactante (Evotherm)

Misturas		Teor de ligante projeto (%)	Resistência à Tração (MPa)	Desvio Padrão	Valor mínimo DNIT 031/2006 (MPa)
04	0,0% CAP+0,5%Evotherm	6,72	0,95	0,16	0,65
05	0,5% CAP+0,5%Evotherm	7,22	0,87	0,17	
06	1,0% CAP+0,5%Evotherm	7,72	0,68	0,07	

Fonte: Própria autora

Os resultados da terceira sequência de ensaios com as misturas M7, M8 e M9 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 0,5% de agente rejuvenescedor são apresentados na tabela 19.

Tabela 19 - Resistencia à Tração - Uso do CAP com adição de agente rejuvenescedor - AR (Extrato NPA)

	Misturas	Teor de ligante projeto (%)	Resistência à Tração (MPa)	Desvio Padrão	Valor mínimo DNIT 031/2006 (MPa)
07	0,0% CAP+0,5%AR	6,72	1,56	0,19	0,65
08	0,5% CAP+0,5%AR	7,22	1,47	0,23	
09	1,0% CAP+0,5%AR	7,72	1,21	0,08	

Fonte: Própria autora

Os resultados da quarta sequência de ensaios com as misturas M10, M11 e M12 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 1,0% de pó de borracha fina e mais 1,0% agente rejuvenescedor são apresentados na tabela 20.

Tabela 20 - Resistencia à Tração - Uso do CAP com adição de borracha e agente rejuvenescedor

	Misturas	Teor de ligante projeto (%)	Resistência à Tração (MPa)	Desvio Padrão	Valor mínimo DNIT 031/2006 (MPa)
10	0,0% CAP+1,0%B+1,0%AR	6,72	0,77	0,18	0,65
11	0,5% CAP+1,0%B+1,0%AR	7,22	0,71	0,03	
12	1,0% CAP+1,0%B+1,0%AR	7,72	1,45	0,11	

Fonte: Própria autora

Os resultados da quinta sequência de ensaios com as misturas M13, M14 e M15 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidas de 2,0% de pó de borracha fina e mais 0,5% agente rejuvenescedor são apresentados na tabela 21.

Tabela 21 - Resistencia à Tração - Uso do CAP com adição de borracha e rejuvenescedor

Misturas		Teor de ligante projeto (%)	Resistência à Tração (MPa)	Desvio Padrão	Valor mínimo DNIT 031/2006 (MPa)
13	0,0% CAP+2,0%B+0,5%AR	6,72	0,87	0,04	0,65
14	0,5% CAP+2,0%B+0,5%AR	7,22	1,09	0,05	
15	1,0% CAP+2,0%B+0,5%AR	7,72	1,10	0,07	

Fonte: Própria autora

Os resultados da sexta sequência de ensaios com as misturas M16, M17 e M18 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 2,0% de pó de borracha fina são apresentados na tabela 22.

Tabela 22 - Resistencia à Tração - Uso do CAP com adição de borracha

Misturas		Teor de ligante projeto (%)	Resistência à Tração (MPa)	Desvio Padrão	Valor mínimo DNIT 031/2006 (MPa)
16	0,0% CAP+2,0%B	6,72	1,21	0,07	0,65
17	0,5% CAP+2,0%B	7,22	0,86	0,12	
18	1,0% CAP+2,0%B	7,72	1,43	0,10	

Fonte: Própria autora

Os resultados da sétima sequência de ensaios com as misturas M19, M20 e M21 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de aditivo surfactante – em % do ligante são apresentados na tabela 23.

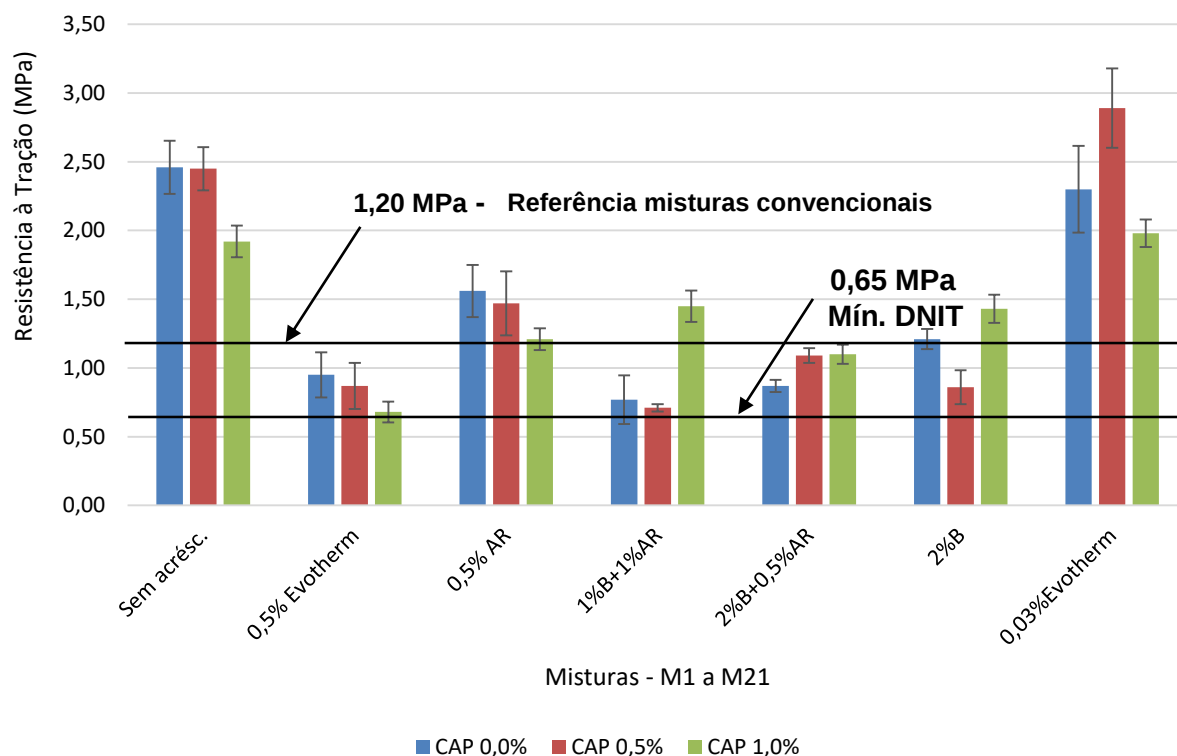
Tabela 23 - Resistencia à Tração - Uso do CAP com adição de aditivo surfactante

	Misturas	Teor de ligante projeto (%)	Resistência à Tração (MPa)	Desvio Padrão	Valor mínimo DNIT 031/2006 (MPa)
19	0,0% CAP+0,03% Evotherm	6,72	2,30	0,32	0,65
20	0,5% CAP+0,03% Evotherm	7,22	2,89	0,29	
21	1,0% CAP+0,03% Evotherm	7,72	1,98	0,10	

Fonte: Própria autora

A figura 39 mostra todos os resultados obtidos para resistência à tração com a apresentação das sete sequências de ensaios com suas respectivas adições de produtos melhoradores de mistura. Observa-se que todas as misturas atenderam ao mínimo preconizado na normativa vigente do DNIT para esse parâmetro.

Figura 39 - Resistencia à Tração - Misturas M1 a M21



Fonte: Própria autora

Lehnem (2015) em ensaio de caracterização mecânica de misturas asfálticas convencionais, utilizando o mesmo ligante CAP 50/70 e dentro da mesma faixa granulométrica “C” do DNIT, com metodologia Marshall para moldagem dos corpos de prova, temperatura de compactação e usinagem de 130°C e Vv de 4,13 %, chegou a um resultado de resistência a tração de 1,50 MPa. A mistura asfáltica reciclada M1 só com 100%CAF e M7 com 100%CAF e adição de AR alcançaram valores de RT de 2,46 MPa e 1,56 MPa respectivamente, observa -se que a mistura M7 que recebeu AR, apresentou redução no grau de rigidez, validando o potencial do agente rejuvenescedor em repor as propriedades originais do ligante envelhecido, diminuindo o grau de rigidez da mistura reciclada.

Os estudos de Aguilar (2016) e Balbo et al. (2006) apresentaram os valores Resistencia à Tração para misturas recicladas todas usando 100%CAF e a adição de CAP conforme tabela 24, sendo que a temperatura de produção do ensaio foi unânime entre 140°C a 145°.

Tabela 24 - Resultados para ensaio de Resistência à Tração

	Aguilar (2016)	Balbo et al. (2006)	Pesquisa atual
% CAP	RT (MPa)	RT (MPa)	RT (MPa)
0,0 %	2,74	3,31	2,46
0,5 %	3,37	2,50 (0,7%CAP)	2,45
1,0 %	3,14	2,96 (0,7%CAP)	1,92
Ligante recuperado (%)	7,42	6,5	5,06

Fonte: Própria autora

Reis (2011) em sua pesquisa usando misturas recicladas com 100%CAF, adição de AR e pó de borracha atingiu o valor de 1,33 MPa. A pesquisa em questão com dosagem semelhante alcançou valores de RT da ordem de 0,77 (M10) e 0,87 MPa (M13). Todas usaram AR nas misturas, sendo a diferença básica de um estudo para o outro misturas foi a temperatura de produção (160°C) e adição de cal.

6.3.3 Estabilidade e Fluência Marshall

A Estabilidade e Fluência Marshall foram determinadas de acordo com a norma DNER-ME 043/95 para as misturas experimentais recicladas M1 a M21. Os resultados para cada mistura asfáltica estudada são apresentados nas tabelas 25 a 31, sendo as misturas de cada tabela agrupadas por tipo de produto adicionado à mistura variando o uso do CAP em 0,0%, 0,5% e 1,0%.

A tabela 25 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M1, M2 e M3 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, sem adição de produto.

Tabela 25 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP

Misturas recicladas		Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
01	0,0% CAP (só fresado)	2.451,23	123,34	4,25	0,96
02	0,5% CAP	2.475,97	167,21	3,33	0,58
03	1,0% CAP	2.612,45	68,35	5,33	0,58
Limites		>500,00 DNIT 031/2006		De 2,00 a 4,50 DNER-ES 313/97	

Fonte: Própria autora

Os resultados da segunda sequência de ensaios com as misturas M4, M5 e M6 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 0,5% de aditivo surfactante são apresentados na tabela 26.

Tabela 26 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP com acréscimo de aditivo surfactante (Evotherm)

Misturas recicladas		Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
04	0,0% CAP+0,5%Evotherm	2.017,62	149,512	5,00	1,000
05	0,5% CAP+0,5%Evotherm	2.006,39	74,289	4,60	0,548
06	1,0% CAP+0,5%Evotherm	1.774,77	37,471	6,00	0,000
Limites		>500,00 DNIT 031/2006		De 2,00 a 4,50 DNER-ES 313/97	

Fonte: Própria autora

Os resultados da terceira sequência de ensaios com as misturas M7, M8 e M9 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 0,5% de agente rejuvenescedor são apresentados na tabela 27.

Tabela 27 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP com acréscimo de agente rejuvenescedor - AR (Extrato NPA)

Misturas recicladas		Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
07	0,0% CAP+0,5%AR	2.229,71	200,380	4,67	0,577
08	0,5% CAP+0,5%AR	2.207,00	189,093	4,67	0,577
09	1,0% CAP+0,5%AR	1.391,94	164,257	4,67	0,577
Limites		>500 DNIT 031/2006		De 2,00 a 4,50 DNER-ES 313/97	

Fonte: Própria autora

Os resultados da quarta sequência de ensaios com as misturas M10, M11 e M12 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 1,0% de pó de borracha fina e mais 1,0% agente rejuvenescedor são apresentados na tabela 28.

Tabela 28 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP com acréscimo de borracha e agente rejuvenescedor

Misturas recicladas		Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
10	0,0% CAP+1,0%B+1,0%AR	1.217,08	53,614	6,33	0,577
11	0,5% CAP+1,0%B+1,0%AR	1.399,66	59,953	4,50	0,577
12	1,0% CAP+1,0%B+1,0%AR	1.539,59	164,649	6,33	0,577
Limites		>500 DNIT 031/2006		De 2,00 a 4,50 DNER-ES 313/97	

Fonte: Própria autora

Os resultados da quinta sequência de ensaios com as misturas M13, M14 e M15 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidas de 2,0% de pó de borracha fina e mais 0,5% agente rejuvenescedor são apresentados na tabela 29.

Tabela 29 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP com acréscimo de borracha e rejuvenescedor

Misturas recicladas		Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
13	0,0% CAP+2,0%B+0,5%AR	1.032,46	149,525	4,67	0,577
14	0,5% CAP+2,0%B+0,5%AR	2.085,33	146,510	5,00	0,000
15	1,0% CAP+2,0%B+0,5%AR	2.036,09	105,680	4,25	1,500
Limites		>500 DNIT 031/2006		De 2,00 a 4,50 DNER-ES 313/97	

Fonte: Própria autora

Os resultados da sexta sequência de ensaios com as misturas M16, M17 e M18 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 2,0% de pó de borracha fina são apresentados na tabela 30.

Tabela 30 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP com acréscimo de borracha e rejuvenescedor

Misturas recicladas		Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
16	0,0% CAP+2,0%B	2.550,46	240,48	2,67	0,577
17	0,5% CAP+2,0%B	2.301,48	118,63	4,67	0,577
18	1,0% CAP+2,0%B	2.794,09	125,33	4,00	1,00
Limites		>500 DNIT 031/2006		De 2,00 a 4,50 DNER-ES 313/97	

Fonte: Própria autora

Os resultados da sétima sequência de ensaios com as misturas M19, M20 e M21 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de aditivo surfactante – em % do ligante são apresentados na tabela 31.

Tabela 31 - Estabilidade e Fluência Marshall - Uso do CAP com acréscimo de aditivo surfactante

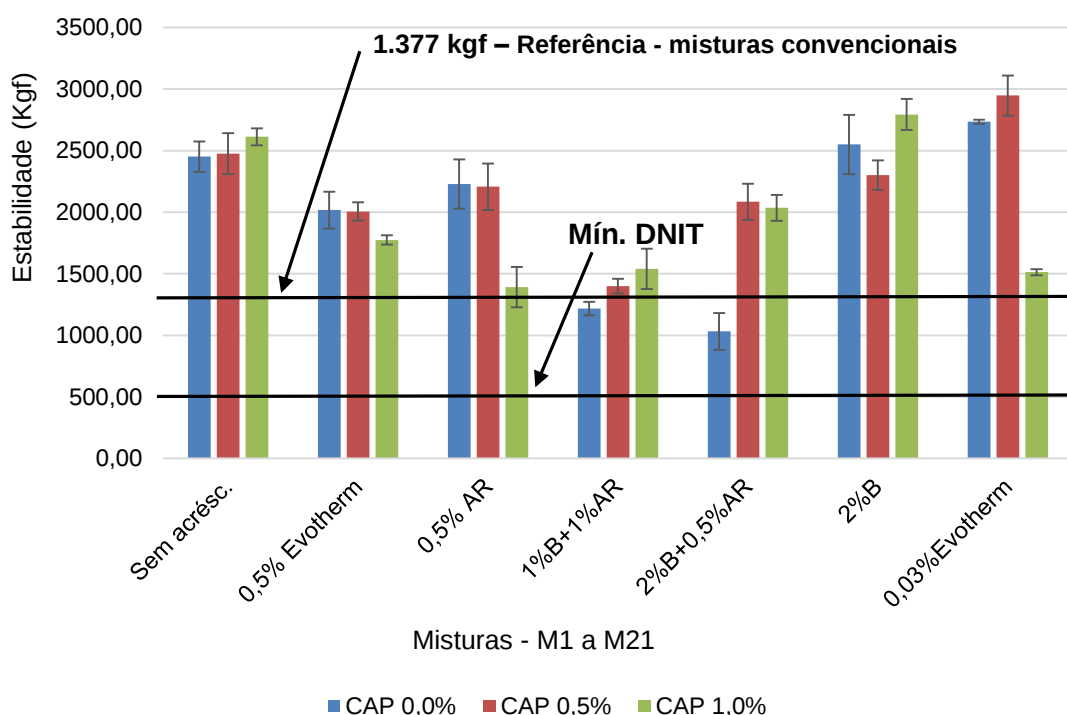
Misturas recicladas		Estabilidade (Kgf)	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Desvio Padrão
19	0,0% CAP+0,03% Evotherm	2.734,79	16,588	5,00	0,000
20	0,5% CAP+0,03% Evotherm	2.948,25	163,198	3,67	0,577
21	1,0% CAP+0,03% Evotherm	1.512,66	24,030	5,33	0,577
Limites		>500 DNIT 031/2006		De 2,00 a 4,50 DNER-ES 313/97	

Fonte: Própria autora

Os resultados obtidos para Estabilidade Marshall podem ser melhor observados na figura 40 com a apresentação das 7 (sete) sequências de ensaios e suas respectivas adições de produtos melhoradores de mistura. Observa-se que todas as misturas atenderam com folga ao mínimo preconizado na normativa vigente do DNIT para esse parâmetro. Verifica-se se que o AR consegue contrabalançar o ligante endurecido do

fresado diminuindo a rigidez da mistura. Balbo e Domingues (2006) observaram a diminuição dos parâmetros mecânicos das misturas estudadas com a adição de AR. Silva (2011) confirma que as alterações do AR são refletidas pela alteração física, química e reológicas da mistura, refletindo na diminuição da consistência resultando numa mistura menos rígida e menos propícia à fadiga e consequente aumento de durabilidade.

Figura 40 - Estabilidade Marshall - Misturas M1 a M21

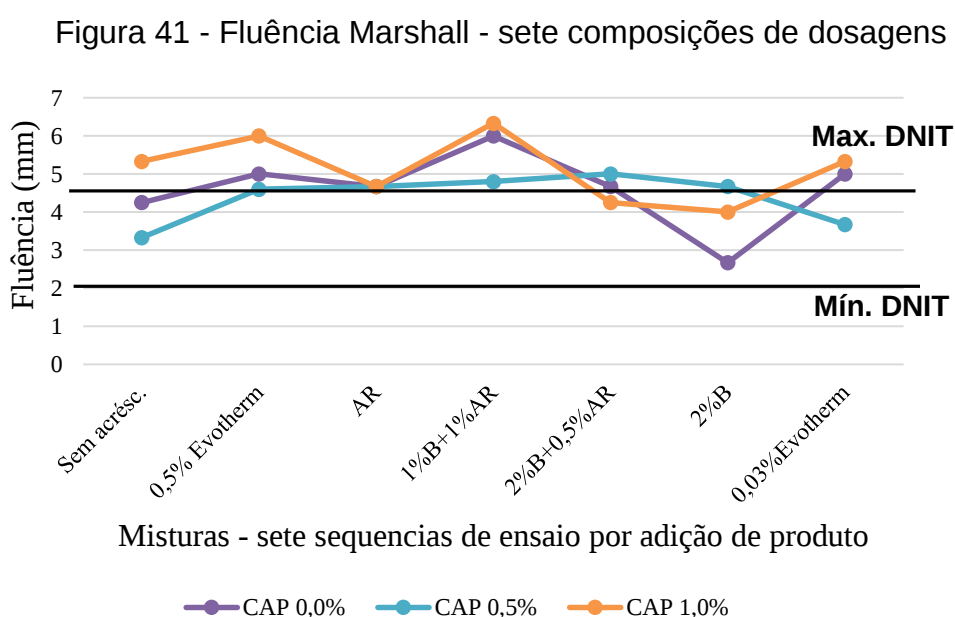


Fonte: Própria autora

Para as misturas M16 a M18 só a adição de borracha não foi suficiente em devolver a flexibilidade à mistura evidenciando a necessidade de adição de AR nessa função. As misturas M4 a M6, com adição de 0,5% (ao teor de ligante total) de aditivo surfactante – Evotherm, apontam um decréscimo interessante da estabilidade, sugerindo uma melhora no grau de rigidez, dentro dos valores esperados para esse parâmetro em misturas asfálticas convencionais para estabilidade. Sendo a mistura M6 (1.773 kgf) a que mais se aproximou dos valores esperados. Coelho Júnior e Rocha (2013) encontraram valores médios de estabilidade Marshall de 1.377 kgf para mistura preparada com CAP 50/70, granulometria faixa C do DNIT.

Nessa pesquisa, as misturas com os acréscimos de AR, pó de borracha e aditivo, que mais se enquadraram em valores de misturas virgem semelhantes foram M6, M9, M11, M12, M13 e M21. Sendo que a maioria das misturas precisaram do AR para redução do grau de rigidez. A pesquisa de Balbo e Domingues (2006) com misturas recicladas 100% CAF com uso de AR e Pó de borracha apresentou resultados da ordem de 564 kgf a 3.780 kgf. Os valores encontrados para nossa pesquisa foram da ordem de 1.096 a 2.948 kgf. Os valores mais reduzidos de Estabilidade Marshall apresentados na pesquisa de Balbo e Domingues (2006) talvez possam ser explicados pela quantidade de AR (3,45 a 20,18%) apesar de estar dentro dos valores recomendados na bibliografias e recomendações técnicas dos fabricantes (até 30% do teor de ligante envelhecido). Zaumanis et al. (2014d) em sua pesquisa usou 12% em massa do ligante recuperado. Nossa pesquisa o AR foi usado no teor em massa do ligante recuperado de 10 a 20%, variando entre 6 e 12g do produto.

Embora não tenham sido encontradas relações sistemáticas entre as dosagens e a fluência apresentada pelas misturas, algum resultado razoável pode ser ao menos graficamente visualizado na figura 41 com observância que as misturas com acréscimo de 0,5%CAP apresentaram certa regularidade nos valores de deslocamento vertical, variando de 3,33 a 5,00 mm, valores próximos ao limite normativo do DNIT de 2,0 a 4,5 mm.



Fonte: Própria autora

De acordo com o Corpo de Engenheiros (1948) apud DER/PR ES-P 28/05 (2007) a fluência do ensaio Marshall é interpretada como a medida da flexibilidade do CAUQ, por essa razão um baixo valor indica uma mistura seca e quebradiça e valor alto como um material macio e plástico.

6.3.4 Ensaio Abrasão – Cântabro

A avaliação de desgaste, propriedades de adesão e coesão das misturas asfálticas recicladas foram realizadas por meio do ensaio DNER - ME 383/99 - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cântabro.

A desagregação dos revestimentos asfálticos é um dos principais precursores das formações dos buracos e painéis pelo arrancamento progressivo dos agregados. Segundo Bernucci et al. (2010), o ensaio usualmente realizado para determinação de resistência à desagregação é o ensaio Cântabro.

Os resultados para cada mistura asfáltica estudada são apresentados nas tabelas 32 a 38, sendo as misturas de cada tabela agrupadas por tipo de produto acrescentado à mistura variando o uso do CAP em 0,0%, 0,5% e 1,0%.

A tabela 32 apresenta os resultados para o ensaio das misturas M1, M2 e M3 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente.

Tabela 32 - Desgaste Cântabro - Uso do CAP

Misturas recicladas		Teor de ligante projeto (%)	Desgaste (%)	Desvio Padrão	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
01	0,0% CAP	6,72	12,69	1,01	20
02	0,5% CAP	7,22	4,64	0,63	
03	1,0% CAP	7,72	7,16	1,09	

Fonte: Própria autora

Os resultados da segunda sequência de ensaios com as misturas M4, M5 e M6 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 0,5% de aditivo surfactante são apresentados na tabela 33.

Tabela 33 - Desgaste Cântabro - Uso do CAP com acréscimo de aditivo surfactante

	Misturas	Teor de ligante projeto (%)	Desgaste (%)	Desvio padrão	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
04	0,0% CAP+0,5% Evotherm	6,72	3,57	0,46	20
05	0,5% CAP+0,5% Evotherm	7,22	2,28	0,29	
06	1,0% CAP+0,5% Evotherm	7,72	1,65	0,25	

Fonte: Própria autora

Os resultados da terceira sequência de ensaios com as misturas M7, M8 e M9 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 0,5% de agente rejuvenescedor são apresentados na tabela 34.

Tabela 34 - Desgaste Cântabro - Uso do CAP com acréscimo de agente rejuvenescedor - AR (Extrato NPA)

	Misturas	Teor de ligante projeto (%)	Desgaste (%)	Desvio padrão	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
07	0,0% CAP+0,5%AR	6,72	8,81	0,79	20
08	0,5% CAP+0,5%AR	7,22	4,72	0,64	
09	1,0% CAP+0,5%AR	7,72	2,52	0,47	

Fonte: Própria autora

Os resultados da quarta sequência de ensaios com as misturas M10, M11 e M12 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 1,0% de pó de borracha fina e mais 1,0% agente rejuvenescedor são apresentados na tabela 35.

Tabela 35 - Desgaste Cântabro - Uso do CAP com acréscimo de borracha e agente rejuvenecedor

Misturas		Ligante projeto (%)	Desgaste (%)	Desvio padrão	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
10	0,0% CAP+1,0%B+1,0%AR	6,72	5,98	1,66	20
11	0,5% CAP+1,0%B+1,0%AR	7,22	2,72	0,15	
12	1,0% CAP+1,0%B+1,0%AR	7,72	2,37	1,33	

Fonte: Própria autora

Os resultados da quinta sequência de ensaios com as misturas M13, M14 e M15 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidas de 2,0% de pó de borracha fina e mais 0,5% agente rejuvenecedor são apresentados na tabela 36.

Tabela 36 - Desgaste Cântabro - Uso do CAP com acréscimo de borracha e rejuvenecedor

Misturas		Ligante projeto (%)	Desgaste (%)	Desvio padrão	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
13	0,0% CAP+2,0%B+0,5%AR	6,72	0,87	0,04	20
14	0,5% CAP+2,0%B+0,5%AR	7,22	1,09	0,05	
15	1,0% CAP+2,0%B+0,5%AR	7,72	1,10	0,07	

Fonte: Própria autora

Os resultados da sexta sequência de ensaios com as misturas M16, M17 e M18 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de 2,0% de pó de borracha fina são apresentados na tabela 37.

Tabela 37 - Resistencia à Tração - Uso do CAP com acréscimo de borracha

	Misturas	Teor de ligante projeto (%)	Desgaste (%)	Desvio padrão	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
16	0,0% CAP+2,0%B	6,72	10,72	2,69	20
17	0,5% CAP+2,0%B	7,22	12,51	1,60	
18	1,0% CAP+2,0%B	7,72	6,72	1,79	

Fonte: Própria autora

Os resultados da sétima sequência de ensaios com as misturas M19, M20 e M21 com 0,0%, 0,5% e 1,0% de CAP respectivamente, acrescidos de aditivo surfactante em % do ligante são apresentados na tabela 38.

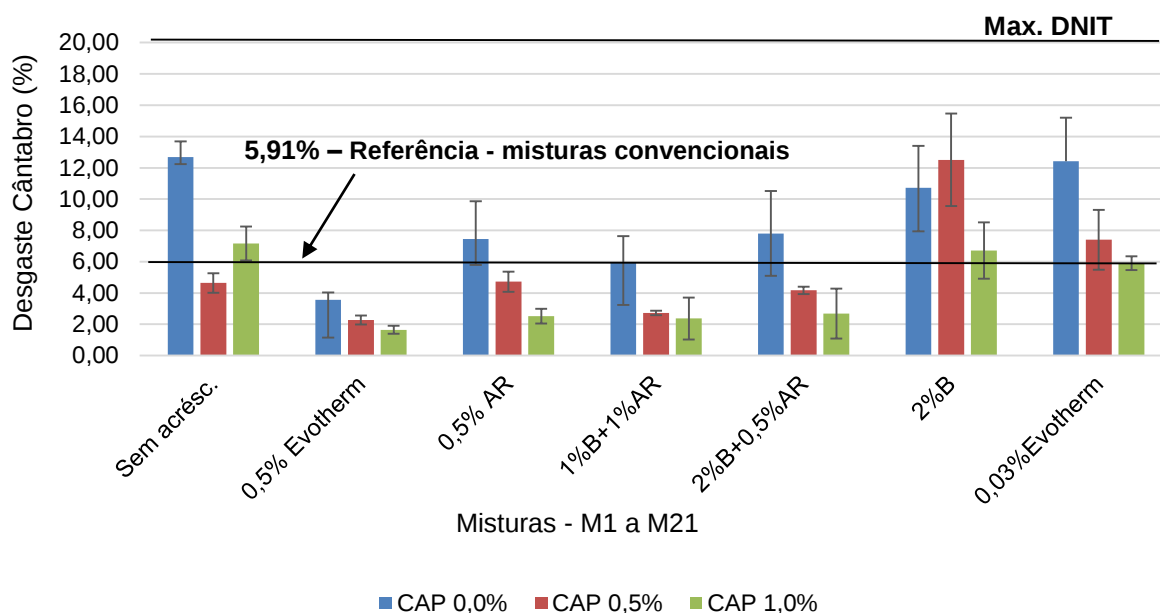
Tabela 38 - Desgaste Cântabro - Uso do CAP com acréscimo de aditivo surfactante

	Misturas	Ligante projeto (%)	Desgaste (%)	Desvio padrão	Variação máxima DNER-ME 383/99 (%)
19	0,0% CAP+0,03% Evotherm	6,72	10,85	0,71	20
20	0,5% CAP+0,03% Evotherm	7,22	6,32	0,60	
21	0,0% CAP+0,03% Evotherm	7,72	5,90	0,44	

Fonte: Própria autora

A figura 42 mostra todos os resultados obtidos para o ensaio de desgaste Cântabro com apresentação dos sete grupos de ensaios com suas respectivas adições de produtos melhoradores de mistura. Observa-se que todas as misturas atenderam ao mínimo preconizado na normativa vigente do DNIT para esse parâmetro.

Figura 42 - Desgaste Cântabro - Misturas 1 a M21



Fonte: Própria autora

Nos 7 (sete) grupos de misturas pode ser observado que as misturas com maior adição de CAP apresentaram respectiva redução de perda de massa. Com exceção da mistura M2 que reduziu a perda de material em relação a M3 ao contrário que se esperava. Da mesma forma a mistura M17 com a adição de 0,5% CAP apresentou maior desgaste nesse ensaio que a mistura M16 sem adição de CAP. A mistura M16 em relação a M13 aumentou 37% a perda de massa, nota -se que o pó de borracha sem o AR favorece a perda de massa. O decréscimo do desgaste ocorreu com as misturas M14 e M15 a qual receberam o agente rejuvenescedor na composição final, melhorando o desempenho da mistura em relação a perda de massa das amostras.

Na pesquisa de Specht (2004b) as misturas convencionais com inserção de agregado borracha apresentam menores perdas de massa, confirmando a necessidade de adição de agente rejuvenescedor nas misturas asfálticas recicladas para alcance do desempenho esperado.

Nessa mesma pesquisa Specht (2004b) encontrou valor de médio, para mistura asfáltica convencional, de 5,91% de perda de massa, Bohn (2017) encontrou perda de massa no valor médio de 9,03% para misturas convencionais, valor que não

distancia da mistura M10, mistura com 100% CAP com AR, valor de 7,45%. Aguilar (2016) encontrou valor de perda de massa de 15,20%, para uma mistura de referência 0,0% CAP, sendo que, nessas mesmas condições nessa pesquisa foi encontrado 12,69% (M1). Contudo, o estudo em questão mostrou que o acréscimo de outros materiais (aditivo surfactante, AR) contribuem para redução da perda de massa em relação à mistura de referência, de acordo com o tipo de produto e quantidade adicionada. Confirmando a pesquisa de Bohn (2017) que as propriedades de adesão e coesão podem ser avaliadas com o ensaio Cântabro.

A figura 43 mostra a aparência dos 3 (três) corpos de prova após a realização do ensaio de desgaste Cântabro para a mistura M1 produzida com apenas 100% de fresado.

Figura 43 - Desgaste Cântabro - Mistura M1



Fonte: Própria autora

A figura 44 exemplifica a aparência do corpo de prova que sofreu o desgaste do ensaio Cântabro e ao lado o mesmo corpo de prova antes da realização do ensaio referente à mistura M2 produzida com 100%CAF a adição de 0,5% CAP.

Figura 44 - Desgaste Cântabro - Mistura M2



Fonte: Própria autora

6.3.4.1 Resumo dos ensaios mecânicos realizados

Os resultados mecânicos dos ensaios realizados nas misturas recicladas nas diversas composições pesquisadas são apresentados na tabela 39 onde foram determinadas faixas de valores requeridos para os ensaios de Resistência à Tração e Estabilidade Marshall fundamentados em resultados investigados de ensaios realizados em misturas asfálticas convencionais para limites inferiores e resultados levantados em misturas recicladas para valores de limites superiores. Os valores requeridos para Fluência foram os normativos do DNIT e para ensaio de Desgaste Cântabro foi indicado um valor, de considerável exigência, encontrados em misturas asfálticas convencionais. O objetivo desse resumo foi buscar uma ou mais misturas que afunilam em melhores resultados capazes de produzirem uma mistura para revestimento asfáltico, ou para uso como tapa-buraco de alta qualidade.

Tabela 39 - Resultados classificados para os ensaios mecânicos realizados

Ensaio	Requisito para ponto	Misturas Recicladas																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Estabilidade Marshall e Fluência Marshall	de 1.300 a 2.500 kgf entre 2 a 4,5 mm																					
Resistência à Tração	1,00 a 2,50 MPa																					
Desgaste Cântabro	≤ 6,0 %																					
Total Pontuação		2,0	3,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5	2,5	3,0	1,5	0,5	1,5	1,0	0,5	2,5

Fonte: Própria autora

Os campos preenchidos em verde à direita da coluna pontuam positivamente (+1) e os campos preenchidos em vermelho à esquerda não pontuam. Sendo assim as misturas M2 e M15 foram as melhores na classificação, seguidas das misturas M8, M9, M12, M14 e M21. Vale ressaltar que todas as misturas, M1 a M21 atenderam aos limites normativos vigentes do DNIT para misturas asfálticas. A atenção em impor um limite superior aos parâmetros de RT e Estabilidade requeridos é delimitar uma mistura menos rígida e menos propícia à fadiga.

6.3.5 Módulo de Resiliência.

O Módulo de Resiliência das misturas asfálticas foram determinadas de acordo com a norma DNIT 135/2018 - ME. Foram moldados 3 (três) corpos de prova para cada mistura, M1, M2, M8, M17 e M20, total de 15 (quinze) corpos de prova. As tabelas 40 e 41 apresentam todos os valores obtidos para o módulo de resiliência na realização do ensaio.

Tabela 40 - Módulo de Resiliência - Resultados dos ensaios - M1, M2 e M8

MR - Módulo de Resiliência – (MPa)									
Determinações	Mistura (01)			Mistura (02)			Mistura (08)		
	CP - 1	CP - 2	CP - 3	CP - 1	CP - 2	CP - 3	CP - 1	CP - 2	CP - 3
1	18.543	19.572	15.706	17.113	19.409	16.598	6.884	17.420	12.495
2	17.994	18.224	15.729	16.539	19.936	16.598	8.060	14.572	11.845
3	17.309	18.088	15.470	15.746	19.966	16.060	9.173	13.740	12.195
MR – CPs (média)	17.949	18.628	15.635	16.466	19.770	16.419	8.039	15.244	12.178
Desvio Padrão CPs	618,25	820,35	143,36	686,42	313,28	310,61	1.144,64	1.929,84	325,32
MR - Mistura (média)	17.404			17.552			11.458		
Desvio Padrão (mistura)	1.569,11			1.921,57			3,615,81		
Nº ciclo de condicionamento	3								
Carga média de ensaio (Kgf)	900,14	964,11	808,95	838,48	903,18	746,34	405,87	499,85	589,89
Deformação média. (mm)	0,0044	0,0046	0,0046	0,0045	0,0041	0,0040	0,0044	0,0029	0,0042
Temperatura °C	25								

Fonte: Própria autora

Tabela 41 - Módulo de Resiliência - Resultados dos ensaios - M17 e M20

MR - Módulo de Resiliência – (MPa)						
Determinações	Mistura (17)			Mistura (20)		
	CP - 1	CP - 2	CP - 3	CP - 1	CP - 2	CP - 3
1	8.804	11.915	12.397	11.689	12.902	7.728
2	8.403	11.804	11.725	11.806	12.597	8.047
3	8.433	11.460	11.518	11.273	12.050	7.680
MR – CPs (média)	8.547	11.726	11.880	11.589	12.516	7.818
Desvio Padrão CPs	233,36	237,23	459,54	280,13	431,69	199,48
MR – Mistura (média)	10.718			10.641		
Desvio Padrão (mistura)	1.881,71			2.488,34		
Nº ciclo de condicionamento	3					
Carga média de ensaio (Kgf)	374,49	499,77	467,05	593,06	685,42	438,82
Deformação média. (mm)	0,0040	0,0037	0,0035	0,0042	0,0046	0,0047
Temperatura °C	25					

Fonte: Própria autora

Os valores obtidos com os ensaios foram superiores as médias encontradas para misturas asfálticas convencionais, ou seja, aquelas confeccionadas com materiais virgens e ligante novos. Conforme citado por Aguilar (2016) os valores comumente encontrados para módulo de resiliência variam entre 2.000 a 8.000 MPa, sendo que para misturas asfálticas convencionais observa -se o MR em torno de 3.200 MPa (BERNUCCI et. al, 2010). Os resultados apresentados na tabela 41 confirmam que as misturas asfálticas recicladas com 100% de material fresado apresentam maior grau de rigidez, comprovando os resultados publicados em pesquisa por Aguilar (2016). Para Bernucci et. al. (2010), as misturas asfálticas que apresentam módulo de

resiliência elevado, de 12.000 a 20.000 Mpa, caracterizam a estrutura do pavimento como um pavimento semi-rígido em relação a sua deformabilidade.

Os resultados obtidos apresentaram significativa dispersão em seus valores, desta forma para um valor médio representativo para o módulo de resiliência foram descartados os valores do CP- 3 da mistura M1, os valores do CP-2 para a mistura M2, os valores do CP-1 da mistura M8, os valores do CP-1 da mistura M17 e os valores do CP-3 da mistura M20, marcados em cor cinza. Com os valores remanescentes foram calculados a média e desvio padrão das amostras apresentados na tabela 42 considerados como sendo o módulo de resiliência representativo para cada mistura estudada.

Tabela 42 - Módulo de Resiliência - Resultados representativos

Parâmetro	Misturas				
	M(01)	M(02)	M(08)	M(17)	M(20)
MR (MPa, 25°C)	18.288	16.442	12.969	11.803	12.053
Desvio Padrão	748,69	477,21	1.145,77	337,74	603,10
RT (MPa, 25°C)	2,38	2,35	2,29	1,54	1,55
Desvio Padrão	0,20	0,05	0,13	0,01	0,22
MR/RT	7.684	6.997	5.664	7.664	7.776

Fonte: Própria autora

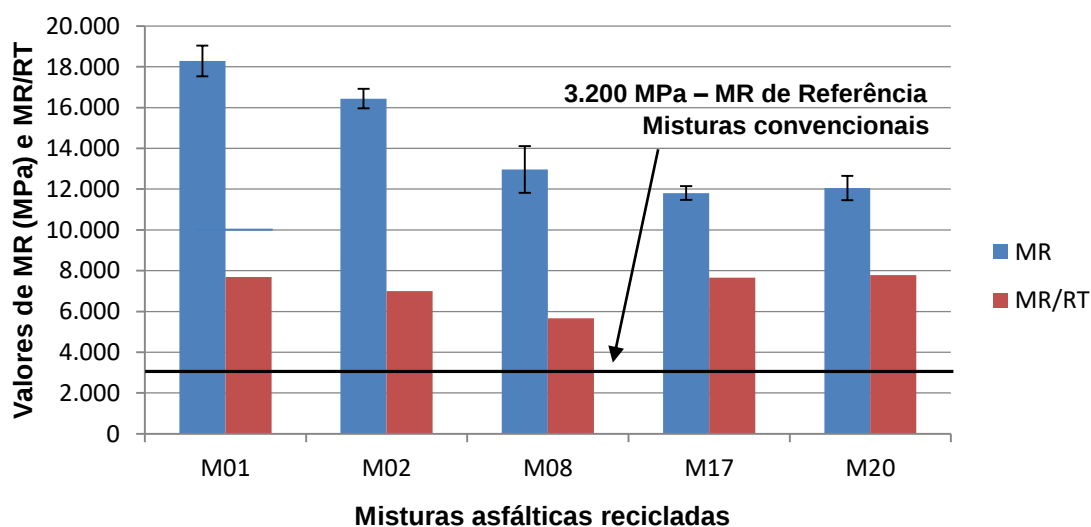
Ao se comparar o resultado do módulo de resiliência da mistura 17 que contém 100% CAF, 0,5 % CAP 50/70 e 2% de pó de borracha , com os resultados observados no experimento de Bertollo et al. (2002b) onde a mistura confeccionada com agregados virgens e ligante novo (CAP-20) acrescido de 2% de pó de borracha também por via seca na mesma faixa de granulometria da borracha desse estudo, verifica-se que o MR das respectivas misturas de referência (sem acréscimo de pó de borracha) é bem maior do que para as misturas com adição borracha confirmando o aumento da flexibilidade e das propriedades viscosas das misturas asfálticas modificadas. Da mesma forma a RT das misturas modificadas foram diminuídas, atendendo ao limite

normativo, melhorando seu o grau de rigidez. Nesse entendimento infere -se que para as misturas recicladas com 100% de material fresado o acréscimo de borracha é positivo.

Comparando a mistura M2 sem adição de AR com a M8 com adição de AR as características mecânicas foram moderadamente afetadas, sendo a estabilidade reduzida em pouco mais de 10% e o módulo de resiliência reduzido em torno de 20%. Essa redução não é negativa pois espera-se que o AR corrobore com a redução do grau de rigidez melhorando o desempenho da mistura. Cuidado deve se tomar para a condição de redução do MR ter ocorrido pela formação de camada dupla, ou seja, a efetiva mistura do ligante novo e do com o agente rejuvenescedor não ter ocorrido, por problemas no controle da temperatura de produção da mistura (ZAUMANIS et al., 2014b; BALBO e DOMINGUES, 2006; GENNEESSEAU, 2015).

A relação módulo de resiliência e resistência a tração tem sido usada como parâmetro nos dimensionamentos das misturas asfálticas para verificar o grau de rigidez da mistura, ou seja, um equilíbrio adequado entre flexibilidade e resistência à tração. A figura 45 registra o resultado dessa relação encontrada para as misturas asfálticas recicladas estudadas.

Figura 45 - Resultados obtidos para Relação Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração (RT) das misturas



Fonte: Própria autora

A mistura modificada com borracha, M17, apresentou queda significativa do MR com 2% de adição de borracha, mas não proporcional à redução da relação MR/RT sugerindo, em princípio, uma maior flexibilidade e resistência à fadiga das misturas modificadas em relação à mistura de referência M2 (BERTOLLO et.al, 2002b).

O módulo de resiliência diminuiu com o acréscimo de produtos melhoradores de misturas, partindo da mistura de referência mistura M1, de módulo elevado 18.288 MPa para decréscimo representativo variando de 16.442 MPa (M2), 12.969 MPa (M8), 11.803 MPa (M17) e 12.053 (M20). Observa-se que a mistura com 0,5%CAP e acréscimo de Agente rejuvenescedor (M8) obteve uma relação MR/RT mais baixa, mostrando que o agente rejuvenescedor cumpriu seu papel em recuperar a flexibilidade da mistura aproximando ao indicado na norma DNER-PRO 269/94 onde módulo de resiliência da mistura reciclada é recomendado em 5000 x RT calculada. Para as demais misturas recicladas ocorreram valores médios de MR da ordem de 7.000 vezes a RT. Para Bernucci et al. (2010) os principais fatores que influenciam os valores de MR são granulometria, volume de vazios, tipo e teor de CAP sendo o último de maior incerteza pela complexidade de obtenção e conjuntura no caso de material fresado.

Segundo Manual Básico de Reciclagem de Pavimentos (2001) se o MR for determinado através do ensaio de tração indireta por compressão diametral, a maior parte dos esforços atuantes será de tração. Este fato reduzirá, significativamente, o efeito dos agregados comparativamente ao ensaio Estabilidade Marshall. Portanto as deformações estarão relacionadas com o ligante asfáltico, e quaisquer mudanças em suas propriedades podem ser mais imediatamente identificadas como por exemplo à variação de quantidade de AR ou produtos adicionados à mistura, fato importante na abordagem dessa pesquisa em determinar as misturas otimizadas através das propriedades físicas da mistura reciclada.

7 CONCLUSÕES

Nessa pesquisa foram realizados os ensaios mecânicos de resistência a tração, estabilidade e fluência marshall, desgaste Cântabro e módulo de resiliência das misturas reciclados com o objetivo de analisar o comportamento das misturas com uso de 100% CAF e assim determinar as composições que atendam aos requisitos normativos.

Baseado nos estudos realizados, com as adições de % CAP, agente rejuvenescedor (AR), aditivo surfactante e pó de borracha, nas misturas asfálticas recicladas pode - se concluir que:

A) A tendência das misturas asfálticas recicladas é apresentar alto grau de rigidez, o qual foi observado nas misturas com 100% CAF, ou seja, em relação à resistência à tração a mistura reciclada apresentou aumento de resistência. As adições de produtos melhoradores de misturas tanto com o agente rejuvenescedor quanto com o pó de borracha diminuíram os valores de RT apresentados. A variações não foram lineares às adições, mas todas as misturas atenderam aos valores limites normativos. A sensibilidade do aditivo surfactante a esse parâmetro foi claramente observada, ao confrontar os valores obtidos das misturas com 0,5% de aditivo com as misturas com 0,03% de aditivo, sugerindo um maior cuidado com a dosagem apropriada e temperatura de produção da mistura.

B) Os valores obtidos pelo ensaio de Estabilidade Marshall indicam que todas as misturas atenderam ao mínimo preconizado na normativas para esse parâmetro. Verifica-se se que o AR consegue contrabalançar o ligante endurecido CAF diminuindo a rigidez da mistura refletindo na diminuição da consistência resultando numa mistura menos rígida e menos propicia à fadiga e consequente aumento de durabilidade. A adição de 2,0% de borracha não foi suficiente em devolver a flexibilidade à mistura, evidenciando a necessidade de adição de AR para esse fim. As misturas com adição de 0,5% de aditivo surfactante – Evotherm, apontam um decréscimo interessante da estabilidade, sugerindo uma melhora no grau de rigidez, entretanto 0,5% da mistura é um teor de aditivo surfactante fora da dosagem indicada nas recomendações técnicas. Já as misturas com adição de 0,5% do teor de ligante,

dosagem recomendada, apresentaram valores crescentes, apontando aumento de rigidez, fora do esperado com exceção da mistura com uso de 1,0% CAP. Observa-se que a adição de 2% pó de borracha associado ao agente rejuvenescedor obteve melhores resultados para a Estabilidade Marshall, principalmente para as misturas que receberam porcentagens de CAP (M14 e M15). Valores médios de Estabilidade Marshall para misturas asfálticas convencionais, tomadas como parâmetro, seriam em torno de 1.400 kgf.

C) Através dos resultados obtidos com os ensaios de desgaste cântabro foi possível observar que o uso de aditivo surfactante Evotherm melhora a trabalhabilidade das misturas recicladas, isto se verificou com a redução da perda de massa com adição do aditivo principalmente nas misturas que receberam % de CAP. Vale ressaltar que tais misturas, alcançaram os atributos requeridos de norma produzidas a temperatura de 145°C sem contribuição do benefícios do AR. Contudo os resultados alcançados mostraram que os acréscimos de AR e pó de borracha contribuem para redução do desgaste e ganho nas propriedades de adesão e coesão. Entretanto as misturas só com adição de 2% de pó de borracha e respectivas % CAP apresentaram os maiores valores de desgaste Cântabro. Sendo assim, ao confrontar esses resultados com as misturas equivalentes agora com adição de AR, confirma-se a importância da reposição das propriedades químicas do ligante envelhecido.

D) Os valores obtidos com os ensaios de módulo de resiliência com as misturas selecionadas foram superiores as médias encontradas para misturas asfálticas convencionais, na faixa de 2.000 a 8.000 MPa, o que era de se esperar pelo estado de envelhecimento do ligante. Foram encontrados valores para o módulo de resiliência de 11.803 a 18.288 nessa pesquisa. Entretanto esses resultados relataram que o MR diminui com os acréscimos de produtos, seja com 0,5% CAP, ou com o acréscimo de AR e pó de borracha, sendo a mistura com adição de 2% de borracha a que apresentou o menor valor de MR. A mistura com 0,5%CAP e acréscimo e AR obteve uma relação MR/RT mais baixa, mostrando que o agente rejuvenescedor cumpriu seu papel em recuperar a flexibilidade da mistura. A influência dos produtos adicionados não afetou os valores da relação MR/RT na mesma proporção, esse fato sugere, em princípio, um ganho em flexibilidade e resistência a fadiga. A exemplo, o MR da mistura (M17) com acréscimo de 2% de borracha caiu em 30% em relação a mistura

sem borracha (M2) o que não ocorreu com a relação MR/RT que nas mesmas condições pouco alterou.

No geral, as misturas com 0,5% e 1,0% de CAP, dentro das composições estudadas, obtiveram as melhores expectativas de desempenho, sendo que algumas misturas apresentaram propriedades volumétricas não atendidas, tais como Vv, VAM e RBV. As variações identificadas em todos os ensaios dessa pesquisa, por vezes evidenciadas no desvio padrão, podem facilmente serem atribuídas à variabilidade dos ensaios e incertezas quanto homogeneidade do material fresado, e dificuldade de controle da temperatura de ensaio. Outro ponto de incertezas são as quantidades reais de ligantes recuperados.

Em relação aos agregados remanescentes do material fresado, são considerados de alta qualidade já submetidos a controle tecnológico e laboratorial para o processo de execução da pavimentação original. Desta forma sugere-se uma gestão desse resíduo em depósitos adequados e próximos as demandas viabilizando o uso nas obras de manutenção das vias com equipamentos compactos e móveis.

Sendo o material fresado (CAF) complexo por apresentar dificuldades em ser caracterizado e controlado para sua reutilização, assim como bastante heterogêneo, conclui-se a necessidade de investigação específica e particular do CAF disponível sem a preocupação inicial de conhecer as características químicas do ligante remanescente, mas sim à caracterização mecânica da nova mistura em alcançar os padrões requeridos para revestimento asfáltico o máximo possível. Para isso podem ser usados equipamentos de uso comum nos laboratórios de obras, de baixo custo como por exemplo a prensa Marshall.

A durabilidade ainda é o parâmetro mais desconhecido. Contudo a temperatura de produção e compactação das misturas deve ser controlada, a fim de alcançar a densidade adequada no concreto asfáltico principalmente quanto à formação da camada dupla onde não ocorreu a efetiva mistura do ligante remanescente com o AR ou mesmo com o ligante novo adicionado.

Por meio dos resultados alcançados nos ensaios realizados nas misturas asfálticas recicladas foi possível observar que o uso do fresado é favorável para aplicações nos serviços de tapa-buracos. 100% CAF em mistura asfáltica a quente fecha o ciclo de vida sustentável dos materiais encontrados no CAF em aplicações específicas e eficientes.

O principal resultado atingido foi fomentar o avanço tecnológico na área de reciclagem de pavimentos asfálticos, visando melhoria do processo de sustentabilidade em obras de pavimentos asfálticos, especificamente às obras viárias de serviços de reparos tipo tapa-buracos frequentemente realizadas pelas prefeituras e órgãos públicos responsáveis por manutenção das vias e rodovias.

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados obtidos e discussões aqui apresentadas, são feitas as seguintes sugestões de trabalhos futuros.

- Avaliar as misturas recicladas com adição de cal para verificação das possíveis melhorias em relação a adesividade e coesão, em detrimento ao uso de aditivos químicos.
- Avaliar as misturas recicladas aqui estudadas com variação da temperatura de compactação e produção buscando as misturas com resultados mais otimizados e mais baratos minimizando o uso de energia para produção.
- Estudar outros teores de dosagens de produtos de maneira a atingir os limites normativos com o mínimo possível de adições e menor custo possível.
- Avaliar e monitorar o desempenho e durabilidade das misturas asfálticas recicladas utilizando os melhores resultados obtidos nessas pesquisas em relação as características mecânicas e parâmetros volumétricos em trechos experimentais ou remendo de tapa-buracos.
- Estudar as propriedades mecânicas das misturas recicladas com outros ensaios como Dano por Umidade Induzida, ensaios de fadiga, para validação dos resultados já obtidos.
- Devido às incertezas quanto ao ligante remanescente e ao CAF, sugere-se a realização dos ensaios com amostragem de 5 (cinco) elementos. A dificuldade na variabilidade e dispersão de alguns resultados com apenas 3 (três) corpos de prova pode comprometer alguns resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES: ANTT. **Avaliação de métodos de dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as propriedades mecânicas**. 2014. Disponível em http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/proj_2_relato_final_litoral_sulantt_do_sagem_fev14rev3.pdf >. Acesso em: 05 jun. 2018.
- AGUILAR, G. S. **Blocos intertravados em concreto asfáltico reciclados à quente** – estudo de viabilidade técnica. 2016. 179f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia dos Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2016.
- ALMEIDA, M. D. et al. Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP. **Construction and Building Material**. Portugal, v 116, p. 1 - 6, Mar. 2016.
- ANITELLI, A. **Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS**. 2013 107f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo. São Carlos.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR NM26**: agregados: amostragem. Rio de Janeiro, 2001. **NBR NM26**: agregados: amostragem. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR NM 53**: agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR NM 7207**: terminologia e classificação de pavimentos: terminologia. Rio de Janeiro, 1982.
- _____. **NBR NM 10.004**: resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 15140**: misturas asfálticas: determinação do desgaste por abrasão Cântabro. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR NM 15.619**: misturas asfálticas - determinação da massa específica máxima medida em amostras não compactada. Rio de Janeiro, 2012.
- BALBO, J. T.; DOMINGUES, M.P. **Estudos de características de misturas asfálticas recicladas a quente com o emprego de usinas transportáveis de pequeno porte**. 2006. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/ptr/Imp/download/Reciclagem%20Marcelo%20e%20Balbo%202006.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2017.
- BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: **Materiais, projetos e restauração**. Oficina de textos. São Paulo, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 3 ed. reimp. Rio de Janeiro: Abeda, 2010. 501 p.

BERTOLLO, S. M.; **Avaliação laboratorial de misturas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. 2002. 252f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Transportes de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2002.

BERTOLLO, S. M. et al; **Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos**. 2002b. Disponível em: <<http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=6245&indexSearch=ID>>. Acesso em 07 jun. 2018.

BOHN. K. et al. **Avaliação das propriedades de adesão e coesão de misturas recicladas mornas com uso de ligantes convencionais e modificado por polímero**. 20ºRPU – Reunião de Pavimentação urbana. Porto Alegre, SC, 2017.

CASTRO NETO, A. M. **Proposta de projeto de dosagem de concreto betuminoso reciclado a quente**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Transportes) - Universidade de São Paulo.

CAVALEIRO, E. A. OLIVEIRA, f. H. L.; A interferencia do módulo de resiliência do concreto asfáltico no período de projeto de pavimentos rodoviários. . **Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)**, v 26 (n.1), abr. 2018.

CICHINELLI, G: **Recuperação e reforço de pavimentos**. 2014. Disponível em: <<http://Infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/37/recuperacao-e-reforco-de-pavimentos-308746-1.aspx>>. Acesso em, 20 fev. 2018.

CLIFTON ASSOCIATES LTD. **Pothole identification, assessment and repair guidelines**. Communities of Tomorrow Leveraged Municipal Innovation Fund. Saskatoon, Canadá. 2012.

COELHO JÚNIOR, M. L. P.; ROCHA, P. H. T. **Estudo de misturas asfálticas a quente utilizadas em obras de pavimentação na região metropolitana de Goiânia**. 2013. 83f. Projeto de Pesquisa – Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. 2013.

DARTORA, N.C. **Caracterização mecânica de uma mistura asfáltica composta por material fresado e cal**. 2015. 87f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil, Centro Universitário Univates, Lajeado, Rio Grande do Sul. 2014.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ: **DER/PR ES-P 12/05**: pavimentação: tapa-buraco. Paraná, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ.
DER/PR ES-P 28/05: Concreto asfáltico usinado a quente, dosagem, produção e controle. Paraná, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006-ES:** Pavimentos flexíveis - concreto asfáltico. Rio de Janeiro. 2006.
 _____. **DNIT 033/2005-ES:** pavimentos flexíveis – concreto asfáltico reciclado a quente na usina. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **DNIT 034/2005-ES:** pavimentos flexíveis – concreto asfáltico reciclado a quente no local. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **DNIT 135/2018-ME:** pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **DNIT 136/2010-ME:** pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **IPR-710:** Manual de conservação rodoviária. Rio de Janeiro: DNIT, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **IPR-719:** Manual de pavimentação. Rio de Janeiro: DNIT, 2006a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **IPR-720:** Manual de restauração de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro: DNIT, 2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **IPR-700:** Glossário de Termos Técnicos Rodoviários. Rio de Janeiro: DNIT, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
NORMA DNIT 005/2003 -TER: defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos – terminologia. Rio de Janeiro: DNIT, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 383/99:** Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cântabro. Rio de Janeiro. 1999.

_____. **DNER – ME 043/95:** misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER – ME 053/94:** misturas betuminosas – percentagem de betume. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER – ME 084/95:** agregado miúdo – determinação e densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **DNER – ES 313/97: pavimentação - concreto betuminoso.** Rio de Janeiro, 1997.

_____. **DNER - PRO 120 - Coleta de amostras de agregados.** Rio de Janeiro, 1997.

_____. **DNER - PRO 199: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório.** Rio de Janeiro, 1996.

ENDRES, L.P. **Dimensionamento à fadiga de pavimentos de concreto asfáltico: comparativo dos custos entre misturas mornas e quentes.** 2016. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2016.

FARIA, J. **Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha.** 2015.137f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia e Ciência dos Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 2015.

FREIRE et al. **O estado da arte sobre uso de reciclado de pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo.** ANPET XXVIII. Curitiba, PR, 2014.

FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V. **Construção de pavimentos.** 2015. Disponível em: <http://www.latersolo.com.br/wp-content/uploads/2015/03/Constru%C3%A7%C3%A3o-de-Pavimentos.pdf>> Acesso em: 03 jun, 2018.

GENNESSEAU, M.M.L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material fresado.** 2015.195f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2015.

HEGGIE, I. G. **Management and financing of roads an agenda for reform.** Disponível em: <<http://www.ssatp.org/sites/ssatp/files/publications/WorldBank-TechnicalPapers/TP275/TP275.pdf>>. Acesso em 10 jul. 2017.

LEAL, C. L. D.; CASTRO, P. F. Aproveitamento da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como fíler em concreto asfáltico. **Vértices.** Campos dos Goytacazes, v 9, n. 1/3, Jan. 2007.

LEHNEM, T. G. **Estudo sobre a compactação de misturas asfálticas em diferentes temperaturas.** 2015. 105f. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)** - Engenharia Civil, Centro Universitário Univates, Lajeado, Rio Grande do Sul. 2015.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas à quente.** 2003. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2003.

LIRA, B. B. **Materiais de construção civil I**. 2005. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAYGAAF/asfalto>>. Acesso em: 01 abr. 2014.

MEDEIROS, D. F.; CAVALCANTE, E.H.; RODRIGUES, J.K.G. **Influência da granulometria nas características mecânicas de misturas asfálticas para aeródromos**. 2009. Disponível em: www.coenge.ufcg.edu.br/publicacoes/Public_364.pdf>. Acesso em: 17 de fev. 2018.

MENDES, L. O. **Utilização o Método Bailey para a Seleção de agregados de Misturas Asfálticas**. 2011.131f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído, Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais. 2011.

MOCELIM, D. M. **Avaliação da trabalhabilidade de misturas asfálticas mornas com o emprego de aditivo surfactante**. 2015. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2015.

MOTTA, R. S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimento de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético**. 2011. 229 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo. 2011.

MANUAL BÁSICO DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS (2001), Fresar - Tecnologia de Pavimentos.

MANUAL DE ASFALTO (1989), Instituto de Asfalto. Série do Manual N° 4 (MS-4)

MARQUES, G.L.O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica, efeito da compactação por impacto e giratória**. 2004. 490f. Tese (doutorado) – Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2004.

MARQUES G.L.O. **Notas de Aula**. 2009. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2009/03/Notas-de-Aula-Prof.-Geraldo.pdf>>. Acesso em jan. 2018.

NAKAMURA, J. **Os tipos de revestimentos, o maquinário necessário e os cuidados na contratação, projeto e execução**. 2011. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/16/pavimentacao-asfaltica-os-tipos-de-revestimentos-o-maquinario-necessario-260588-1.aspx>>. Acesso em: 14 jul.2017.

NASCIMENTO, M. V. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas**. 2011. 123f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2011.

ODA, S. FERNANDO JÚNIOR, J. **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação.** Acta Scientiarum. Maringá, v 13(n.6), p. 1589-1599. 2001.

OLIVEIRA, J.A. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo.** 2013. 142f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2013.

ONGEL, A; HUGENER, M. Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen. **Construction and Building Materials.** Turkey, v 91, p. 467 - 474, Set. 2015.

PADULA, F. R. G.; WILLIS, R.; TAILOR, A. Challenging aspects of high CAF mixtures and the use of warm-mix to improve fatigue performance. **NCAT**, Columbus, v.29, Jan. 2014.

QUINÁLIA, E. **Variabilidade do material que sai das usinas é a principal causa de patologias precoce nos pavimentos de asfalto.** 2005. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/102/artigo285003-1.aspx>>. Acesso em: 20 fevereiro. 2018.

REIS, A. C. C. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas em usina protótipo de escala reduzida.** 2013. 115f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2013.

Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia

ROMIER, A.; OLARD, F. **Low emission e low energy asphalts for sustainable road construction:** the Europe experience of Lea process. 2016. Disponível em: <http://www.lea-uk.biz/lea-uk2015/uploads/2016/06/Low-emission-and-low-energy-asphalts-for-sustainable-road-construction-The-European-experience-of-LEA-process.pdf>>. Acesso em: 20 fev.2018.

RUBIO, M.C.; MARTINEZ, G.; BAENA, L.; MORENO, F. Warm mix asphalt: an overview. **Journal of Cleaner Production.** Granada, v 24, p. 76-84, Nov. 2011.

SALINI, R.B. **Utilização de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas.** 2000. 120f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2000.

SANTOS, J. M. R. **Materiais utilizados na construção de pavimentos rodoviários.** 2010. 131f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Aveiro. Disponível em: <<https://ria.ua.pt/bitstream/10773/4365/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Materiais%20Utilizados%20na%20Constru%C3%A7%C3%A3o%20de%20Pavimentos%20Rodovi%C3%A1rios%20-%20Joana%20Santos.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2017.

SILVA, L. S. et al. Envelhecimento UV de ligantes asfálticos. **Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)**, v 13(n.2), out. 2009.

SILVA, M.R.D.; OLIVEIRA, J.R.M.; JESUS, C.M.G. Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? **Resources, Conservation and Recycling**. Guimarães, Portugal, v 60P. 38 – 48, Nov. 2011.

SOLOCAP. **Equipamentos e Manuais**. Disponível em: <http://www.solocap.com.br/detalhe.asp?idcod=PRENSA%20MARSHALL%20MANUAL>> Acesso em: 20 fev. 2018.

SOUZA, F. S.V. **Avaliação do desempenho de pavimentos restaurados por meio de técnicas de reciclagem de materiais de pavimentação**. 2009. 10f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Geotécnica, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2009.

STATE NEW YORK DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – NYT/DOT, New York. 2013. **Evotherm: Warm Mix Asphalt Technology**. Disponível em: < <https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/technical-services/technical-services-repository/details/evotherm.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2018.

SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. **Avaliação laboratorial do emprego do ligante asfalto-borracha em concreto asfáltico**. 17o Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro, 2004a.

SPECHT, L.P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004.280f. Tese (Doutorado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

SUPERINTENDENCIA DE DESENVOLVIMENTO DA CAPITAL. **Manual prático de operações de tapa-buracos**, 2ª ed. Belo Horizonte. 2011.

THOMAS, T. **Comparação do teor de ligante de projeto determinado pela DMT e DMM de diferentes misturas asfálticas**. 2015. 76f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. 2015.

TRICHÊS, C. **Avaliação do desempenho da reciclagem do pavimento da rodovia SC 303**. 2011. Disponível em: <<http://cbrcbrasvias.com.br/palestras/arquivos/tc0036-3.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

XAVIER, E.F. P. et al. **Operação tapa buraco, superficial e profundo**. 2014. 22f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2014.

ZAUMANIS, M; MALLICK, R. B.; FRAN. Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100 % recycled asphalt. **Materials and Construction**. DOI 10.1617/s11527-014-0332-5. Worcester. Mai. 2018.

ZAUMANIS, M; MALLICK, R. B.; FRANK, R. 100% recycled hot mix asphalt: a review and analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, Worcester, v 92, p. 231-244, Ago. 2014b.

ZAUMANIS, M.; MALLICK R.B. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant produced pavements: state of the art. **International Journal of Pavement Engineering**, Worcester, v.16, p. 39-55, Jan. 2014c.

ZAUMANIS, M; MALLICK, R. B.;POULIKAKOS,L; FRANK, R. Influence of six rejuvenators on the performance proprieties of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. **Construcion and Building Materials**, Worcester, v 71, p. 538-250, Nov. 2014d.

ZUBARAM, M. **Tecnologias viabilizam a aplicação de asfalto reciclado**. 2011.Disponível em:

http://www.revistamt.com.br/index.php?option=com_contenido&task=viewMateria&id=860>. Acesso em: 16 abril. 2017.