



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Samuel Almeida Fonseca

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA RECICLAGEM A QUENTE DE
CONCRETO ASFÁLTICO FRESADO PARA APLICAÇÃO A FRIO COMO
MATERIAL PARA CONFECÇÃO DE REMENDOS**

Belo Horizonte

Março de 2018

Samuel Almeida Fonseca

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA RECICLAGEM A QUENTE DE
CONCRETO ASFÁLTICO FRESADO PARA APLICAÇÃO A FRIO COMO
MATERIAL PARA CONFEÇÃO DE REMENDOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Reciclagem, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Linha de Pesquisa: Reciclagem

Orientador: Dr. Flávio Renato de Góes Padula

Belo Horizonte

Março de 2018

Fonseca, Samuel Almeida.

F676e Estudo da viabilidade técnica da reciclagem a quente de concreto asfáltico fresado para aplicação a frio como material para confecção de remendos / Samuel Almeida Fonseca. – 2018.
104 f. : il., fotos, grafs., tabs.

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

CDD: 620.196

Ficha elaborada pela Biblioteca - Campus I – CEFET-MG

Bibliotecário: Wagner Oliveira Braga CRB6 - 3261

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA RECICLAGEM A QUENTE DE
CONCRETO ASFÁLTICO FRESADO PARA APLICAÇÃO A FRIO COMO
MATERIAL PARA CONFECÇÃO DE REMENDOS**

Dissertação apresentada em 26 de março de 2018 por Samuel Almeida Fonseca, ao Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Reciclagem, aprovada pela banca examinadora constituída dos professores:

Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula - orientador

Titulação, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Cláudio José Martins

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Belo Horizonte, 26 de Março de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me abençoar e me proporcionar maravilhas, tanto na vida profissional quanto pessoal, e em especial por ter me guiado na conclusão deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Maria Rita e Francisco que com apoio, paciência e amor me ajudaram muito a ser quem eu sou hoje. Agradeço a minha irmã, Tamara, e familiares por estarem presentes em minha vida me ajudando de alguma forma.

Agradeço a NTA Asfaltos e Lwart Lubrificantes por ter fornecido o CAP 60/85 e o REOB, respectivamente. A Sudecap por ter fornecido o material fresado presente na regional oeste.

Ao Prof. Flávio Renato de Góes Padula por ter acreditado em minha capacidade para desenvolver o tema proposto e ainda, por sua compreensão, visão crítica e disposição, fundamentais para conclusão desta obra

A todos os professores do CEFET/MG pelo direcionamento nos anos de convivência, desde a fase de aluno no curso de Engenharia de Materiais até ingressar no mestrado. A Bartira Neves, colega de pesquisa, por ter me ajudado e compartilhado conhecimentos comigo na execução do presente trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Mestrado de Engenharia de Materiais por seu trabalho correto e eficiente no apoio às atividades do curso e também aos funcionários de Departamento de Engenharia de Transportes.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente me impulsionaram seja com uma palavra amiga ou sabendo me escutar quando precisei desabafar.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende” (Leonardo da Vinci)

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”
(Albert Einstein).*

RESUMO

Sabe-se que, com o passar dos anos, o pavimento asfáltico torna-se danificado devido à intempéries e esforços repetitivos causados pelo tráfego. Com isso, ocorre o aparecimento de defeitos na superfície do pavimento, como trincas, afundamentos, buracos, dentre outros. A manutenção dos pavimentos torna-se necessária devido a este fato. Como material de descarte da manutenção das vias tem-se o que chamamos de concreto asfáltico fresado (CAF), principal material desta pesquisa. Aliado a questões ambientais e econômicas, o presente trabalho propõe a reciclagem do CAF com adição de REOB (*Re-refined engine oil bottom*) e ligante asfáltico com SBS (Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP 65/80). Buscou-se produzir uma mistura asfáltica reciclada a quente que possa ser aplicada a frio (temperatura ambiente) em operações “tapa-buracos”. Fez-se a caracterização físico-química do CAF e das misturas de remendos através de técnicas do MEV e EDS, bem como a confecção dos corpos de prova conforme a metodologia Marshall. Os corpos de prova foram testados no ensaio de tração à compressão diametral, estabilidade/fluência Marshall a fim de avaliar se a mistura será viável tecnicamente para esse tipo de aplicação. Os resultados mostraram que para 15% de REOB a aplicação a frio é viável, porém tal material necessita ser aplicado em locais onde o mesmo fique confinado, como é o caso de remendos de buracos, devido à redução significativa da resistência. Foi possível verificar que a redução da quantidade de REOB para 10 e 5% apresentou uma melhora relativa da resistência, porém ocorre uma piora da trabalhabilidade do material a frio.

Palavras-chave: Reciclagem à quente; Concreto Asfáltico Fresado; SBS, REOB, remendos.

ABSTRACT

It is known that over the years, asphalt pavement becomes damaged due to some factors, such as inclement weather, and the repetitive stresses caused by traffic. This leads to the appearance of defects in the surface of the pavement, such as cracks, sinkings, holes, among others. The maintenance of the pavements becomes necessary due to this fact. As material for discarding road maintenance we have what we call asphalt concrete milling (CAF), the main material of this research. In addition to environmental and economic issues, the present work proposes the recycling of CAF with REOB (Re-refined engine oil bottom) and asphalt binder with SBS (CAP 60/85). It is intended here to produce a hot recycled asphalt mixture which can be applied cold (ambient temperature) in "pothole" operations. The CAF and the patching mixtures were characterized by MEV and EDS techniques, as well as the preparation of the specimens according to the Marshall methodology. The specimens were tested in the diametral compression, stability / creep Marshall test in order to evaluate if the mixture will be technically feasible for this type of application. The results showed that for 15% REOB the cold application is feasible, but such material needs to be applied in places where it is confined, as in the case of pothole patches, due to the significant reduction of the resistance. It was possible to verify that the reduction of the amount of REOB to 10 and 5% showed a relative improvement of the resistance, but a worsening of the cold material workability occurs.

Key-words: hot recycling, concrete asphalt milled, SBS, REOB, patches

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da seção transversal de um pavimento com destaque para suas principais camadas.....	22
Figura 2 – Principais Camadas do Pavimento Flexível.....	23
Figura 3 – Estrada do Mar.....	24
Figura 4 – Exemplo de um rolo de corte de uma fresadora.....	29
Figura 5 – Exemplo de fresadora e de serviço de fresagem em uma rodovia.....	30
Figura 6 – Fresado: revestimento asfáltico deteriorado triturado.....	30
Figura 7 – Esquema do processo de reciclagem a quente em usina.....	32
Figura 8 – Representação esquemática de uma usina de asfalto.....	33
Figura 9 - Reciclagem a Quente In Situ com Fresagem a Quente.....	34
Figura 10 – Estrutura química do polímero SBS.....	38
Figura 11 – Processo de produção do REOB.....	40
Figura 12 – Exemplo de superfície de pavimento com a presença de trincas interligadas.....	42
Figura 13 – Representação de um defeito por afundamento numa via.....	43
Figura 14 – Representação esquemática de um revestimento desgastado.....	43
Figura 15 - Painelas resultantes da deterioração do pavimento.....	44
Figura 16 – Remendo na via.....	45
Figura 17 – Representação esquemática do procedimento de confecção dos remendos permanentes.....	47
Figura 18 – Fluxograma de experimentos.....	49
Figura 19 – Amostra de CAF utilizada.....	51
Figura 20 – Amostra de REOB adicionada na mistura asfáltica.....	53
Figura 21 – Amostra de Cal utilizada na mistura asfáltica.....	54
Figura 22 – Extrator de betume utilizado no ensaio.....	56
Figura 23 - MEV Modelo SSX-550.....	65
Figura 24 - Metalizadora Sanyu Electron.....	65
Figura 25 – Representação esquemática da preparação da mistura até a etapa de moldagem do CP.....	69
Figura 26 – Equipamento utilizado no ensaio de tração por compressão diametral....	70
Figura 27 – Exemplo de uma curva carga-deslocamento para determinação da Estabilidade e Fluência Marshall.....	72

Figura 28 – Amostra de fresado após o ensaio de teor de betume.....	74
Figura 29 – Conjunto de peneiras utilizadas no ensaio.....	76
Figura 30 – Material fresado após passagem no conjunto de peneiras.....	76
Figura 31 – Curvas granulométricas dos materiais.....	77
Figura 32 – Morfologia dos agregados miúdos do fresado com ligante.....	79
Figura 33 – Micrografia do fresado com ligante em um aumento menor.....	80
Figura 34 – Representação gráfica do ensaio EDS para a amostra do fresado com betume.....	81
Figura 35 – Representação Esquemática dos Procedimentos para o Ensaio de Resistência a Água das Misturas para Tapa Buraco.....	83
Figura 36 – Comparativo das quatro misturas de tapa buraco após o ensaio de resistência a água.....	84
Figura 37 – Representação Esquemática das Etapas do Ensaio de Trabalhabilidade das Misturas de Tapa Buraco.....	85
Figura 38 – Corpo de Prova acoplado na máquina de tração por compressão diametral.....	87
Figura 39 – Gráfico de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	88
Figura 40 – Corpo de prova no molde de Estabilidade/Fluência Marshall.....	89
Figura 41 – Resultados do Ensaio de Estabilidade Marshall.....	90
Figura 42 – Resultados do Ensaio de Fluência Marshall.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução da rede rodoviária federal e estadual (Km).....	26
Tabela 2 – Benefícios de diferentes tipos de modificadores de asfalto.....	37
Tabela 3 – Especificações técnicas do CAP 60/85.....	52
Tabela 4 – Especificações Técnicas do REOB.....	53
Tabela 5 – Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.....	58
Tabela 6 – Teores de Betume para o CAF ensaiados.....	74
Tabela 7 – Granulometria dos Materiais.....	75
Tabela 8 – Cálculo da Gmm das Misturas e do Fresado Inicial.....	78
Tabela 9 – Resultados de Gsa, Gsb e Absorção dos Agregados do Fresado.....	78
Tabela 10 – Resultados das Propriedades Volumétricas dos Fresados e CP's.....	82
Tabela 11 – Resultados de Resistência a Tração por compressão diametral.....	87
Tabela 12 – Valores de RT pro estudo da mistura de 7,5%.....	92
Tabela 13 – Valores de Estabilidade/Fluência para o estudo da mistura de 7,5%.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM = *American Society for Testing and Materials* (USA)
CAF = Concreto Asfáltico Fresado
CAP = Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT = Companhia Nacional de Transportes
CP = Corpo de prova
DNIT = Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNER = Departamento de Estradas e Rodagem
EDS = Espectrometria de Energia Dispersiva
EVA = Acetato de Vinila
MEV = Microscopia Eletrônica de Varredura
MR = Módulo de resiliência
SBS = Estireno-Butadieno-Estireno
SBR = Estireno-Butadieno-Rubber
ABS = Acrilonitrilo-butadieno-estireno
RET = Etileno-n-Butil Acrilato-Glicidil Metacrilato
PVC = Poli(cloreto) de Vinila
REOB = (*Re-refinded oil engine bottom*)
Gsb = Densidade aparente do agregado
Gsa = Densidade real do agregado
a = Absorção de água do agregado definida em percentual
Gmm = Densidade máxima da mistura
 γ = Massa específica do material pulverulento
 σ_R = resistência à tração
Kgf = Quilograma força
MPa = Mega Pascal
%b = % de asfalto (betume)
Sudcap = Superintendência de Desenvolvimento da Capital

Sumário

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo Geral	19
2.2 Objetivos Específicos	19
2.3 Justificativa	19
2.4 Estrutura de Trabalho	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Pavimentos	21
3.1.1 Tipos de Pavimentos	21
3.1.1.1 Pavimentos Flexíveis	22
3.2 Breve histórico da pavimentação	24
3.3 Situação atual da pavimentação no Brasil	26
3.4 Misturas asfálticas recicladas	28
3.4.1 Misturas Asfálticas Recicladas à Quente em usina	31
3.4.2 Misturas Asfálticas Recicladas à Quente <i>in situ</i>	33
3.5 Asfalto modificado por polímero	34
3.5.1 Tipos de Polímeros Modificadores de Asfalto	37
3.6 SBS (Estireno-Butadieno-Estireno)	38
3.7 REOB (Re-recycled engine oil bottom)	39
3.8 Defeitos de superfície asfálticas	41
3.8.1 Trincas	42
3.8.2 Afundamentos	42
3.8.3 Desgaste	43
3.8.4 Panelas ou Buracos	44
3.9 Remendos	45
3.9.1 Remendos Simples	46
3.9.2 Remendos Compactados	46
3.9.3 Remendos Permanentes	47
4 MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1 Materiais	51
4.1.1 Concreto Asfáltico Fresado (CAF)	51
4.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 60/85)	52
4.1.3 REOB (Plastificante Asfáltico)	53

4.1.4 Cal (Óxido de Cálcio, Cao).....	54
4.2 Métodos.....	55
4.2.1 Ensaio de caracterização dos materiais constituintes do CAF e do REOB	55
4.2.1.1 Determinação do percentual de Betume	56
4.2.1.2 Ensaio de granulometria do CAF com e sem ligante	58
4.2.1.2.1 Densidade aparente, real e absorção dos agregados e densidade máxima da mistura (Gmm)	60
4.2.1.3 Morfologia e caracterização microscópica (MEV) com detector (EDS)	65
4.2.2 Ensaio de Inspeção Visual nas Misturas de Tapa Buraco.....	67
4.2.2.1 Ensaio de Inspeção Visual de Resistência a água	67
4.2.2.2 Ensaio de Inspeção Visual de Trabalhabilidade nas misturas.....	68
4.2.3 Ensaio Mecânicos nos CPs	68
4.2.3.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral	70
4.2.3.3 Determinação da Estabilidade e Fluência Marshall.....	72
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
5.1 Resultado dos ensaios de caracterização do fresado	74
5.1.1 Determinação do percentual de Betume	75
5.1.2 Ensaio de Granulometria do CAF com e sem ligante.....	76
5.1.2.1 Determinação da (Gmm) da mistura, (Gsb), (Gsa) e absorção dos agregados	78
5.1.3 Morfologia e Caracterização Microscópica (MEV) acoplado com EDS	79
5.2 Resultado dos Ensaio nos Corpos de Prova	82
5.3.1 Ensaio Não Destrutivos	82
5.3.1.1 Resultado das Propriedades volumétricas, absorção de água e índice de vazios	83
5.3.1.2 Resultado do Ensaio de Inspeção Visual de Resistência a água	84
5.3.1.3 Resultado do Ensaio de Inspeção Visual de Trabalhabilidade nas misturas.....	85
5.3.2 Ensaio Destrutivos.....	87
5.3.2.1 Resultados do Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	87
5.3.3 Resultados do Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall	89
5.3.5 Estudo das Propriedades Mecânicas da mistura com 7,5% de ligante total	92
6 CONCLUSÕES	94
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

A pavimentação é sempre destaque na economia de um país e possui grande parcela no total de patrimônios, uma vez que é responsável pelo movimento de pessoas e cargas, essencial para o desenvolvimento. Com isso, associa-se as riquezas de um país com a qualidade e extensão de sua malha rodoviária pavimentada.

No geral, a pavimentação é submetida a pesados e repetidos esforços devido ao tráfego de veículos, o que pode acarretar diversos tipos de defeitos, tais como trincas por fadiga, deformações plásticas ou permanentes, buracos ou panelas, dentre outros.

Para melhorar as condições de tráfego, antes que haja comprometimento da vida útil dos pavimentos, as rodovias passam por processos constantes de manutenção e recuperação, que muitas das vezes é feito por meio de fresagem seguida por recapeamento com uma nova camada de revestimento asfáltico.

Como produto do processo de fresagem, obtêm-se o Concreto Asfáltico Fresado (CAF), sendo composto por agregados soltos recobertos por ligante asfáltico. A fresagem traz diversos benefícios ao pavimento, como por exemplo, a manutenção de alturas de *grade* da pista, remoção de camada com trincas, obtenção de superfície mais plana e com adequado caimento transversal, além da obtenção de superfície com boa rugosidade para adequada aderência entre o pavimento e a camada de recapeamento. (AGUILAR, 2016)

A geração de CAF é constante devido ao fato da manutenção de rodovias ser um processo contínuo, com isso sua disponibilidade é abundante. O CAF é geralmente armazenado em depósitos públicos ou ao longo de encostas de rodovias. No Brasil, sua reutilização tem ocorrido principalmente como material para construção de revestimentos primários de vias não pavimentadas e bases de pavimentos. Nos EUA, é comum a reciclagem a quente de CAF através da mistura de CAF e materiais virgens (geralmente entre 20 e 50% de CAF e o restante de agregados e ligante virgens). Tal reciclagem permite a aplicação do material reciclado em camadas intermediárias e capas de rolamento de pavimentos asfálticos. Existem exemplos práticos de sucesso

onde 100% de CAF foi reciclado a quente (e aplicado a quente) para uso em capas de rolamento. Essa tecnologia, para produção de grandes volumes de material, demanda grandes investimentos em Usinas Asfálticas adequadas para tal, o que dificulta o processo.

Atualmente a tecnologia chamada “Asfalto Frio” tem sido utilizada para a produção de “mistura asfáltica pronta para uso”, a qual pode ser estocada por prazo definido. Tal tecnologia consiste em adicionar um material plastificante (material para tornar o ligante asfáltico trabalhável em temperatura ambiente) à mistura asfáltica (agregados e ligante asfáltico). Os ligantes asfálticos disponíveis no mercado, tais como emulsões asfálticas, asfaltos diluídos e CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) não permitem a estocagem da mistura asfáltica sem o endurecimento da mesma (o que impede sua adequada compactação no processo de tapa-buraco).

A mistura asfáltica pronta para uso na temperatura ambiente tem sido largamente utilizada como material para operações tapa-buracos, o que permite agilidade e facilidade no processo, tendo em vista dias chuvosos e a falta de usinas asfálticas para produção de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) em algumas regiões.

As operações tapa-buracos comuns em cidades brasileiras fazem uso geralmente de CAUQ, onde a aplicação do mesmo deve ocorrer a quente (cerca de 140°C) e em locais secos, o que dificulta o processo. A Mistura Pronta nada mais é que a adição do material plastificante (neste trabalho é utilizado o REOB - *Re-refined oil engine bottom*) durante o processo de usinagem do CAUQ (100% de material virgens – ligante asfáltico e agregados).

Existe uma busca constante pelo desenvolvimento de tecnologias com menor impacto ambiental, redução de custos, maior facilidade e agilidade de aplicação. Com isso, os materiais provenientes de pavimentos deteriorados, tal como o concreto asfáltico fresado, se tornaram fontes renováveis, considerados materiais recicláveis e de maior valor econômico.

Assim, neste trabalho, busca-se verificar a possibilidade de se produzir a mistura asfáltica pronta para uso em temperatura ambiente, visando sua aplicação em tapa-

buracos, a partir de 100% de CAF reciclado a quente. Tal estudo é possivelmente inédito, pois não se identificou até o momento bibliografia que trate de tal assunto. O processo de reciclagem a quente de pequenas quantidades pode ser viabilizado através de Mini Usinas recicladoras que são móveis (montadas em carretas rebocáveis por veículos de pequeno porte). Tais usinas são simples e podem ser facilmente construídas através do uso de betoneiras de obras de construção civil e o uso de queimadores para aquecimento do material a cerca de 160°C. Deste modo, acredita-se, assim, que a tecnologia aqui investigada pode ser de utilidade pública, viabilizando a produção de pequenas quantidades de materiais para serviços de tapaburacos com grandes benefícios econômicos e ambientais.

A adição de polímeros aos ligantes asfálticos tradicionais, vem mostrando melhorias da condição do asfalto como por exemplo, maior coesão do ligante e adesão aos agregados, maior resistência ao envelhecimento e a redução da susceptibilidade térmica. Estas alterações contribuem para uma maior estabilidade em suas propriedades tornando o asfalto mais elástico ou mais duro, refletindo em maior resistência à fadiga e à deformação permanente.

Um polímero bastante utilizado adicionado em ligantes asfálticos é o SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) que é um elastômero. Becker e col. (2001) falam que o SBS é provavelmente o polímero mais apropriado para a modificação do asfalto.

O SBS tem como característica principal sua alta resposta elástica que promove a deformação permanente por alongamento e recuperação. Além disso, possui características reológicas de elastômeros termoplásticos, que escoam quando aquecido. Também apresenta razoável resistência mecânica e de resiliência. O grupo estirenobutadieno propicia ao ligante asfáltico aumento da rigidez, resistência ao craqueamento (incluindo o craqueamento a baixas temperaturas), aumento das propriedades de adesão da mistura, e geralmente é adicionado na faixa de 3 a 6% em peso da mistura (Kuennen, 2005).

Um outro aditivo que está sendo pesquisado em aplicações asfálticas é o REOB (*Re-refined oil engine bottom*). O termo REOB, tal como utilizado neste trabalho, refere-se estritamente ao produto residual da destilação a vácuo na torre de re-refinaria de

óleo lubrificante usado. REOB é o resíduo não destilável da reciclagem de óleo usado de motores por destilação atmosférica seguida de destilação a vácuo. Acredita-se que a adição de REOB confere a mistura uma maior plasticidade e possibilita uma aplicação a frio (temperatura ambiente, 25°C) mais prática e localizada no defeito da superfície.

Na tentativa de se identificar adequadas aplicabilidades do uso do REOB e do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 60/85 adicionados ao CAF reciclado a quente ao menor custo possível, investiga-se a possibilidade de uso dessa mistura resultante, como matéria-prima para confecção de materiais para remendos de buracos de vias. Partiu-se da hipótese de que o CAP 60/85 poderá conferir a mistura uma maior resistência à deformação e ao envelhecimento ao passo que o REOB conferiria uma plasticidade, ajudando nas operações “tapa-buracos” com aplicação de misturas asfálticas na temperatura ambiente.

Este projeto é voltado para a linha de pesquisa reciclagem à quente do concreto asfáltico fresado e vai de encontro as necessidades de desenvolvimento tecnológico sustentável e eficiente, enfatizado pela necessidade de destinação do material envelhecido (CAF) e encontra ainda forte justificativa no desafio de reabilitação de pavimentos asfálticos em diversas rodovias brasileiras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de aplicabilidade de Concreto Asfáltico Fresado (CAF) reciclado a quente com adição de REOB e CAP 60/85 para aplicação a frio como material de tapa-buraco, em pavimentos flexíveis.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, busca-se no presente estudo:

- Avaliar a viabilidade técnica de produção de mistura asfáltica reciclada a quente e aplicada a frio para reparos na operação “tapa-buracos”;
- Realizar a caracterização físico-química do CAF;
- Identificar a influência de diferentes porcentagens do REOB e do CAP 60/85 no comportamento da mistura com o Concreto Asfáltico Fresado (CAF);
- Avaliar o desempenho mecânico (tração/estabilidade e fluência) das misturas asfálticas estudadas.

2.3 Justificativa

A pesquisa aqui proposta é justificada pelos seguintes pontos:

- Adição de SBS confere a mistura boas características mecânicas de resistência ao desgaste e ao envelhecimento;
- Uso do REOB pode conferir uma plasticidade a mistura asfáltica possibilitando sua aplicação a frio;
- Desenvolvimento de uma mistura asfáltica para “tapa-buracos” mais eficaz e com maior praticidade;
- Os benefícios econômicos e ambientais podem ser significativos ao reciclar a quente o CAF e aplicar a frio para confecção do remendo;

- Misturas asfálticas recicladas a quente e aplicadas a frio, mesmo tendo qualidade inferior às misturas aplicadas a quente, podem ser úteis em determinadas aplicações onde não se dispõe de misturas quentes;
- Tais misturas aplicadas a frio podem ser utilizadas em dias de chuva e são produtos que podem ser estocados pronto para uso. Tais características se mostram extremamente úteis para execuções de serviços de tapa-buracos emergenciais e em regiões onde não se dispõe de usinas de asfalto;
- As reciclagens de CAF a quente podem ser feitas através de equipamentos simples e de baixo preço, chamados mini usinas recicladoras. Esses equipamentos são de fácil transporte, muitas vezes acoplados unidades que podem ser rebocadas por veículos de pequeno porte.

2.4 Estrutura de Trabalho

No presente capítulo é apresentado uma introdução do assunto que se refere a pesquisa com utilização de agregado fresado, tema pertencente à área de reciclagem.

No capítulo 2 serão expostos o objetivo geral e os objetivos específicos, assim como a justificativa para o estudo.

No capítulo 3, foi realizada uma revisão bibliográfica, com informações e estudos de diversas fontes e autores, estrangeiros e brasileiros, de modo a dar um embasamento teórico sobre a reciclagem do agregado fresado.

O capítulo 4 expôs os materiais e métodos, juntamente com suas características específicas, e também a metodologia empregada para a realização dos ensaios, necessários para a consecução dos objetivos desta pesquisa.

No capítulo 5 foram apresentados e discutidos os resultados da pesquisa, propostos no capítulo 3 durante a metodologia.

No capítulo 6 foi apresentada a conclusão do trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Pavimentos

O pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao custo mínimo possível, considerando diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação obrigatórios (BALBO, 2007).

Conforme Santana (1993), o pavimento é uma estrutura construída sobre a superfície obtida pelos serviços de terraplanagem com a função principal de fornecer ao usuário segurança e conforto, que devem ser conseguidos sob o ponto de vista da engenharia, isto é, com a máxima qualidade e o mínimo custo.

De acordo com a (NBR 7207/82), o pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem e destinada economicamente e simultaneamente em seu conjunto a:

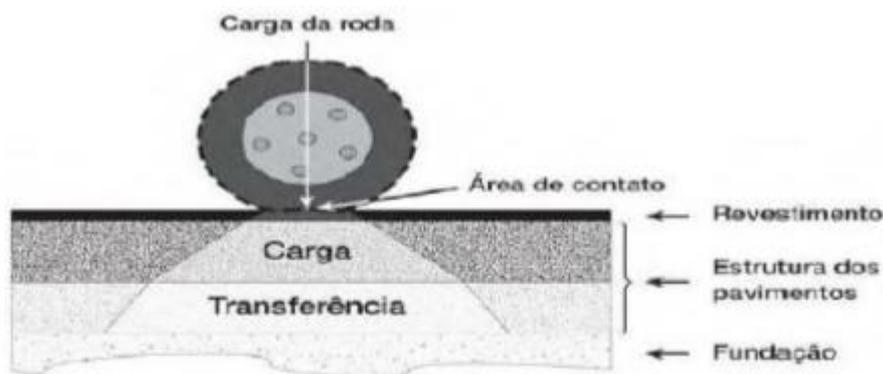
- Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- Resistir aos esforços horizontais que nele atuam tornando mais durável a superfície de rolamento.

3.1.1 Tipos de Pavimentos

Os pavimentos possuem diversas classificações levando em consideração muitos fatores. Quanto a estrutura eles podem ser classificados em pavimentos rígidos, pavimentos semi-rígidos ou semi-flexíveis e pavimentos flexíveis.

A figura 1 a seguir, mostra a seção transversal de um pavimento, destacando os principais esforços atuantes.

Figura 1 – Representação esquemática da seção transversal de um pavimento com destaque para suas principais camadas



Fonte: (WIRTGEN, 2008, apud BARROS, 2013, p.19)

A escolha de cada um dos pavimentos depende de vários fatores, os pavimentos rígidos, por exemplo, são utilizados mais frequentemente em áreas de tráfego urbano mais intenso, porém o flexível tem um custo menor e o tempo de execução é mais rápido. (UFPR, 2012 apud GARBIN, 2013).

Na escolha do tipo de revestimento utilizado, é realizado um estudo técnico-econômico. Para os serviços de alto padrão, como o caso das rodovias principais, utiliza-se concreto asfáltico como revestimento, no caso de rodovias secundárias, tem sido utilizado pré-misturado a frio, ou tratamento superficial duplo, ou triplo, e alguns casos, também concreto asfáltico. Geralmente em serviços de estradas vicinais, vêm sendo usados tratamentos superficiais (SOUZA, 2004).

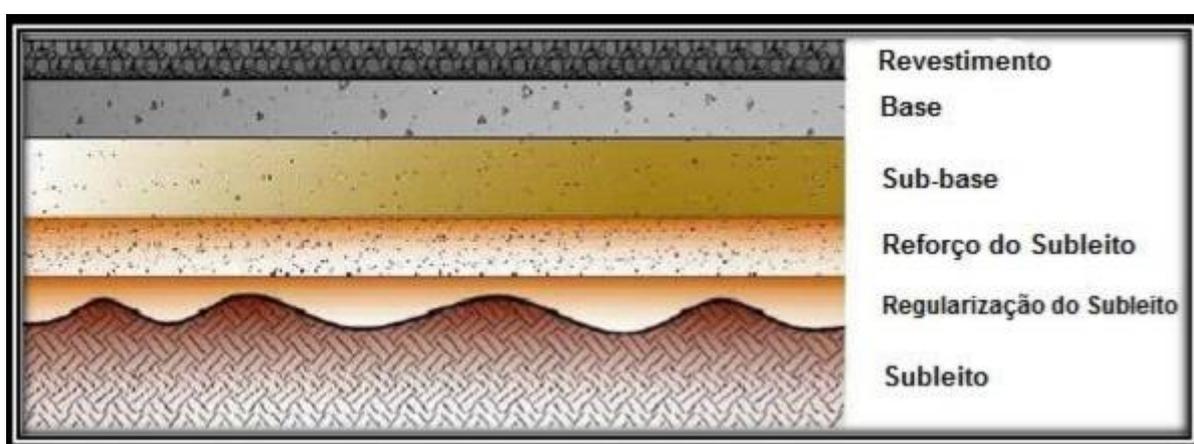
3.1.1.1 Pavimentos Flexíveis

No presente trabalho é pesquisado sobre os pavimentos flexíveis, assim sendo, conforme o DNIT (2006) o pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformações elásticas significativas, sob carregamento aplicado, então a carga se distribui entre as camadas. Exemplo típico: pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica.

“É chamado flexível, o pavimento executado de revestimento betuminoso sobre uma base granular, e de rígido o pavimento executado com concreto de cimento Portland” (TRAMONTINI; CHONG; SPECHT, 2008, p. 1).

Os pavimentos flexíveis podem ser classificados por possuir misturas betuminosas fabricadas a quente ou misturas betuminosas fabricadas a frio, de acordo com Silva, (2009). Na figura 2 a seguir é mostrado a estrutura das camadas do pavimento flexível:

Figura 2 – Principais Camadas do Pavimento Flexível



Fonte: (MARQUES, 2007)

As misturas betuminosas fabricadas a frio são produzidas, depositadas e compactadas sem necessidade de aquecimento dos materiais constituintes e são compostas por agregados aos quais se junta uma emulsão betuminosa (ligante), podendo, ainda, adicionar água e aditivos. São misturas geralmente aplicadas em camadas de pavimento onde as solicitações não são significativas, como em bairros e subúrbios. Já as misturas fabricadas a quente são produzidas de forma que, pelo menos, um dos componentes, agregado ou betume, seja aquecido. Os componentes são misturados em uma central ou numa betoneira sendo posteriormente transportados, esparramados e compactados dando forma a uma camada de pavimento.

A principal vantagem é a rapidez de execução, quanto à construção do pavimento ou as reparações, são mais fáceis e rápidas, podendo assim, liberar o tráfego mais rápido. A estrutura do pavimento deforma quando submetido às cargas do tráfego.

Composto por várias camadas que devem trabalhar em conjunto para absorver as tensões verticais de compressão até aos níveis que o terreno de fundação possa suportar, cada camada absorve parte das solicitações imposta e transmite o restante às camadas localizadas em níveis inferiores, sem que haja deformações excessivas na estrutura do pavimento (BROCHADO, 2014).

3.2 Breve histórico da pavimentação

A construção de vias de transporte é uma preocupação e atividade de remotas civilizações e entender a história da pavimentação é compreender a própria história da humanidade, desde o povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercâmbio comercial, cultural e religioso, urbanização e desenvolvimento.

Como exemplo desse início, tem-se que umas das mais antigas estradas pavimentadas implantadas não se destinou a veículos com rodas, mas a trenós para o transporte de cargas a fim de construir as pirâmides do Egito.

Com o passar dos anos e com o avanço da tecnologia, as estradas passaram por intensos processos de transformação, passou-se a ter uma maior preocupação quanto ao planejamento das mesmas, considerando, a geometria, a compactação, conservação e matérias-primas. Na América Latina, destacam-se por exemplo, estradas construídas pelos incas, descritas como trabalhos úteis e modernos.

No Brasil, de acordo com Bernucci et. all. (2008) uma das primeiras estradas reportadas tem início em 1560, à época do terceiro governador-geral do Brasil, Mem de Sá. Trata-se do caminho aberto para ligar São Vicente ao Planalto Piratininga como mostra a figura 3:

Figura 3 – Estrada do Mar



Fonte: (BERNUCCI et al. 2008)

Conforme o DNIT, deixando de lado os caminhos de carroças que ligavam cidades e vilas brasileiras desde o século XVI, foi apenas com a inauguração da estrada União Indústria, em 1861, que a história do rodoviarismo nacional começava a ser escrita. Entretanto, mesmo depois da União Indústria e até alguns anos após a criação do DNER, em 1937, essa história continuava sem ter muito o que dizer.

Destaca-se em 1937 a criação, pelo presidente Getúlio Vargas, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), subordinado ao Ministério de Viação e Obras Públicas. Na década de 1940 observou-se um avanço de pavimentação fruto da tecnologia desenvolvida durante a 2ª Guerra Mundial. Em 1942, houve o contato de engenheiros brasileiros com engenheiros norte-americanos que construíram pistas de aeroportos e estradas de acesso durante a guerra utilizando o então recém-desenvolvido ensaio. Neste ano o Brasil possuía apenas 1.300km de rodovias pavimentadas, uma das menores extensões da América Latina. (BERNUCCI et. all., 2008, p. 18-19)

Conforme Balbo (2007) na década de 1990, o governo federal e os governos estaduais no Brasil engajaram-se em processo de concessão da operação e manutenção de rodovias à iniciativa privada. Embora o estado de São Paulo a tarifação de pedágios existisse desde a década de 1970 nas principais rodovias, a administração pública decidiu pela privatização da operação, como alternativa mais eficiente de garantia de investimentos privados no setor rodoviário. Esperavam-se reflexos do aumento de capacidade viária de rodovias pelas concessionárias e conseqüentemente uma melhoria na qualidade de conservação e manutenção em uma primeira fase.

De acordo com a tabela 1 extraída de Bernucci et. all. (2008), tem-se:

Tabela 1 – Evolução da rede rodoviária federal e estadual (Km)

Ano	Federal			Estadual		
	Pavimentada	Não-pavimentada	Total	Pavimentada	Não-pavimentada	Total
1970	24146	27394	51540	24431	105040	129471
1975	40190	28774	68964	20641	86320	106961
1980	39685	19480	59165	41612	105756	147368
1985	46455	14410	60865	63084	100903	163987
1990	50310	13417	63727	78284	110769	189053
1993	51612	13783	65395	81765	110773	192538
2003	57143	14049	71192	84352	111410	195762
2005	58149	14651	72800	98377	109963	208340
2007	61304	13636	74940	106548	113451	219999

Fonte: (BERNUCCI et. al. 2008)

Percebe-se uma evolução das rodovias tanto federais como as estaduais, houve um aumento da porcentagem de rodovias pavimentadas em detrimento das não-pavimentadas, o que mostra um avanço tanto econômico quanto tecnológico da construção civil. Observa-se também que em 2007 o Brasil já continha quase 220.000km de rodovias construídas.

3.3 Situação atual da pavimentação no Brasil

De acordo com Schroeder & Castro (1996) a opção pela modalidade rodoviária como principal meio de transporte de carga é um fenômeno que se observa a nível mundial desde a década de 50, tendo como base a expansão da indústria automobilística associada aos baixos preços dos combustíveis derivados do petróleo. No Brasil, a ênfase no transporte rodoviário, que se consolida à mesma época, está associada à implantação da indústria automobilística no país e à mudança da capital para a região Centro-Oeste, que foram acompanhadas de um vasto programa de construção de rodovias. Diferentemente do que ocorreu a nível mundial, no entanto, esta ênfase traduziu-se não só na prioridade, mas na quase exclusividade das políticas de transporte voltadas para o modal rodoviário, pelo menos até a década de 70.

Segundo dados do Geipot, 2001, aproximadamente 60% do transporte de cargas realizado no Brasil é rodoviário. O modal ferroviário responde por 21%, o aquaviário por 14%, o dutoviário por 5% e o aéreo por menos de 1%. O modal de transporte rodoviário encontra-se em parte em estado deficiente, sendo os investimentos nas rodovias prioritários neste momento, não apenas por ser o modal mais utilizado, mas por exigir menor investimento quando comparado aos demais modais. Destaque-se ainda que pelo modal rodoviário circulam 96% dos passageiros. (BERNUCCI et al., 2008).

Sabe-se que a maioria dos pavimentos no Brasil é considerado de condições insatisfatórias tanto quanto ao desempenho, segurança e economia quanto ao baixo conforto ao rolamento, e com isso, estima-se que 1 a 2 bilhões de reais, por ano, são gastos com manutenção das rodovias federais. Para uma total recuperação da malha rodoviária seriam necessários cerca de 10 bilhões de reais, e paralelamente a este fato, o investimento em infraestrutura rodoviária está bem abaixo do necessário para o setor.

De acordo com os dados atualizados da CNT (2016) já em 2004 as estradas brasileiras avaliadas na pesquisa eram classificadas como deficientes/ruins/ péssimas em seu estado geral, esse índice ficou em 74,7%, e em 2009, 69,0% de regular/ruim/péssimo. Observa-se uma leve melhoria, mas de forma muito lenta. Ressalta-se que, nos três quesitos avaliados na pesquisa, ou seja, pavimento, sinalização e geometria da via, a qualidade do pavimento está estabilizada com aproximadamente 55% de regular/ruim/péssimo desde 2004.

Pesquisa divulgada em 2015 pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) mostra que 57,3% dos cerca de 100 mil quilômetros de rodovias avaliadas apresentam algum tipo de deficiência em relação à pavimentação, sinalização ou geometria da via. De toda a malha visitada pela CNT, 6,3% estavam em péssimo estado, 16,1% foram considerados ruins e 34,9%, regulares. Segundo o levantamento, 42,7% da extensão rodoviária foram classificados de bom ou ótimo, tendo assim “condições adequadas de segurança e desempenho”. Além disso, apenas 12,4% da malha rodoviária nacional é pavimentada. Isso corresponde a 213,3 mil km dos 1,72 milhões de km de rodovias no país. (SILVEIRA, 2017).

Como mencionado, são substanciais os gastos com manutenção e reconstrução precoce de nossos pavimentos. Esses gastos são inaceitáveis uma vez que pode dispor de equipamentos de laboratório e de campo que permitam um melhor entendimento dos materiais e de métodos de projeto teórico-empíricos. A existência de uma infraestrutura laboratorial e a formação de recursos humanos de alto nível na área torna possível a investigação de materiais alternativos e novas tecnologias para as camadas do pavimento. (BERNUCCI et al., 2008).

3.4 Misturas asfálticas recicladas

De acordo com Moreira (2005), a reciclagem de pavimentos asfálticos não é uma ideia recente. Ela teve início na Índia e Singapura, em 1930, com o uso da reciclagem a quente. Foi nesta mesma década que o *Road Research Laboratory* iniciou experimentos com reciclagem a frio in situ. Porém, apenas a partir do ano de 1970 esse assunto ganhou mais atenção. Este episódio ocorreu devido a alguns fatores, em especial, ao aumento dos custos de construção rodoviária decorrente da alta do preço do asfalto decorrentes dos embargos do petróleo.

No Japão, a reciclagem de pavimentos tem sido vista como o método do futuro quanto à manutenção das vias. Aproximadamente 90% do material fresado de capa asfáltica é reciclado e reaproveitado na pavimentação (TAKAHASHI et al., 2002). Nos Estados Unidos cerca de 80% de toda a massa asfáltica nova contém material fresado, trazendo economia quanto ao consumo de energia, CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) e novos agregados (ARAÚJO, 2004).

Existem atualmente, diversas técnicas para reciclagem de pavimentos. Os autores costumam definir como cinco as principais técnicas: a frio (*Cold planning*) a quente (*Hot recycling*), a quente in situ (*Hot in-place recycling*); a frio in-situ (*Cold in-place recycling*); reciclagem profunda do pavimento (*Full depth reclamation*). Especificamente no presente trabalho será usada a reciclagem a frio.

A reciclagem torna-se necessária quando o pavimento asfáltico em uso torna-se deteriorado estruturalmente. Com isso faz-se a adição de espessuras de camadas novas de pavimentos ou através do corte de todo ou parte do revestimento deteriorado

pela fresadora e execução de nova camada de revestimento asfáltico. O material gerado no corte, o concreto asfáltico fresado, pode ser reaproveitado por reciclagem.

Fresagem é a operação de corte, por uso de máquinas especiais, de parte ou de todo o revestimento asfáltico existente em um trecho de via, ou até englobando outra camada do pavimento, como forma de restauração da qualidade ao rolamento da superfície, ou como melhoria da capacidade de suporte. (BERNUCCI et al, 2008)

No mercado, existem vários tipos de fresadoras, que utilizam rolos repletos de pontas cortantes pelo fato de existir diamante nas ponta das mesmas. Como exemplo de rolo de corte utilizado numa máquina fresadora, tem-se a figura 4:

Figura 4 – Exemplo de um rolo de corte de uma fresadora



Fonte: (BERNUCCI et. al, 2008)

Normalmente os agregados de uma mistura envelhecida mantêm as suas características físicas e de resistência mecânica intactas, enquanto o ligante asfáltico tem suas características alteradas, tornando-se mais viscoso nessa condição. É possível reaproveitar totalmente o material triturado ou cortado pelas fresadoras e recuperar as características do ligante com a adição de agentes de reciclagem ou rejuvenescedores. (BERNUCCI et. al.,2008)

O processo de fresagem ocorre com a retirada da camada mais externa de pavimento pela máquina fresadora e com auxílio dos rolos de corte. Define-se a faixa na qual

deverá ser retirado material e a máquina passa recolhendo o pavimento residual do processo e armazenando num caminhão como mostrado na figura 5:

Figura 5 – Exemplo de fresadora e de serviço de fresagem em uma rodovia



Fonte: (BERNUCCI, 2008)

A figura 6 mostra o produto resultante do processo de fresagem que é o concreto asfáltico fresado, um dos materiais de estudo do presente trabalho.

Figura 6 – Fresado: revestimento asfáltico deteriorado triturado



Fonte: (SEGUNDO et. al., 2015)

Um dos grandes obstáculos para aumentar a taxa de reciclagem de pavimentos asfálticos e sua utilização é o fato das pessoas acreditarem que o desempenho do revestimento reciclado é inferior ao desempenho do pavimento convencional. No

entanto, o desempenho dessas misturas recicladas é tão bom quanto o das misturas convencionais.

3.4.1 Misturas Asfálticas Recicladas à Quente em usina

O uso de reciclagem a quente teve início na Índia e em Singapura, no início da década de 30 (NICHOLLS, 1996 apud REIS, 2013). No entanto, sua utilização em larga escala só teve desenvolvimento na década de 70, com o aumento dos custos de construção rodoviária decorrente da alta do preço do petróleo (ROBERTS et al., 1996 apud REIS 2013).

A reciclagem a quente consiste no método no qual o pavimento asfáltico existente é removido por intermédio de uma fresadora ou outro equipamento capaz de arrancar a camada superficial total ou parcialmente a uma profundidade previamente estabelecida que é depois transportada para um local de estocagem para que seja reciclada em usina. (LIMA, 2003)

Entende-se por reciclagem de pavimentos em usina a quente o processo pelo qual os materiais provenientes de revestimentos deteriorados são misturados a quente, em usina, com agregados novos, em proporções adequadas. Esse processo tem por objetivo produzir uma nova mistura asfáltica a quente que atenda aos requisitos de qualidade, resistência e durabilidade exigidos para a nova camada em que a mistura será utilizada. (IBARRA, 2003).

A figura 7 a seguir mostra o ciclo de reciclagem a quente que passa o concreto asfáltico fresado durante o processo de reciclagem a quente.

Figura 7 – Esquema do processo de reciclagem a quente em usina



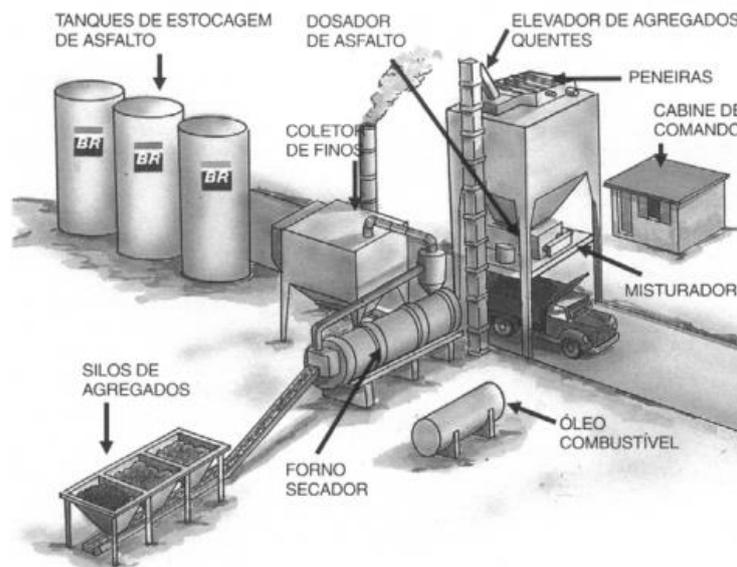
Fonte: (PIRES, 2008)

A reciclagem a quente em larga escala envolve a utilização de material com uma dispersão de características muito elevada quando comparada ao processamento de mistura a quente convencional nova em usina. Assim sendo, os projetos de reciclagem a quente em usina exigem cuidadosa avaliação do pavimento, rigorosa caracterização dos materiais em laboratório e rígido controle do processo de produção para que se garanta a qualidade do material reciclado. (CASTRO, 2003).

O método de reciclagem a quente em usina, como pode ser observado anteriormente, é semelhante à produção de misturas a quente convencionais, pois os tipos de usinas utilizadas, procedimentos e equipamentos de distribuição e compactação são os mesmos, com poucas adaptações. Além do mais, as vantagens dessa técnica são semelhantes ou superiores ao desempenho da técnica convencional, com a capacidade de corrigir defeitos superficiais, deformações permanentes e trincas existentes na camada de revestimento, além de ser economicamente viável e ecológica. (FEDRIGO, 2014).

O processo de produção de misturas a quente tradicionais em usina é mostrado na figura 8 abaixo desde os tanques de estocagem de asfalto até silos de agregados.

Figura 8 – Representação esquemática de uma usina de asfalto



Fonte: (LIMA, 2003)

A figura 8 mostra uma representação esquemática das principais partes que compõem uma usina de asfalto, desde os silos com agregados a serem misturados no ligante até a coleta da mistura final pelo caminhão.

3.4.2 Misturas Asfálticas Recicladas à Quente *in situ*

DNIT (2006) define a reciclagem a quente no local como:

A reciclagem a quente no local ou “in situ” é definida como um processo de correção de defeitos de superfície, através do corte e fragmentação do revestimento asfáltico antigo (geralmente por fresagem), mistura com agente rejuvenescedor, agregado virgem, material ou mistura asfáltica, e posterior distribuição da mistura reciclada sobre o pavimento, sem remover do local original o material a ser reciclado.

O DNER (1996) define dois tipos de procedimentos: um deles usa um equipamento móvel de misturas recicladas em que a fresagem do revestimento asfáltico é realizada a frio e a mistura é preparada a quente. Caso seja necessária a adição de agregado, esse deve ser espalhado sobre o pavimento, antes da fresagem. E o outro procedimento realiza primeiro um pré-aquecimento da superfície, seguido da

utilização de um equipamento que conjuga unidades fresadoras com câmaras de aquecimento, que efetua a fresagem a quente do revestimento asfáltico. Nos dois processos, após a mistura dos materiais, é realizado o espalhamento e a posterior compactação da mistura reciclada.

Na reciclagem a quente no local deve se ter um cuidado maior na escolha do tipo e a quantidade de agente rejuvenescedor, pois o revestimento reciclado pode sofrer afundamento nas trilhas de roda se o ligante possuir viscosidade muito baixa ou se for adicionado agente rejuvenescedor em excesso, para que isso não ocorra o projeto deve ser bem executado e deve haver um controle tecnológico adequado (DNIT, 2006).

A Figura 9 apresenta os procedimentos de operação da reciclagem a quente in situ do pavimento asfáltico.

Figura 9 - Reciclagem a Quente In Situ com Fresagem a Quente



Fonte: (LIMA, 2003)

A figura 9 acima, mostra o funcionamento de uma usina de reciclagem a quente de asfalto, em que todo o processo é feito continuamente, desde a fresagem do pavimento até a confecção da nova mistura e aplicação.

3.5 Asfalto modificado por polímero

Para ampliar sua resistência, os cimentos asfálticos de petróleo podem ser modificados através de adições de asfaltos naturais como gilsonita (EUA), asfaltita

(Argentina), e Asfalto de Trinidad ou ainda por adição de fílers (cal, cimento, sílica, etc), fibras (fibras de vidro, asbestos, fibras de celulose e fibras poliméricas) ou por enxofre elementar. A modificação mais empregada atualmente é através do uso de polímeros (estireno butadieno randômico (SBR), copolímero de estireno e butadieno (SBS), copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA) e Etileno-n-Butil Acrilato-Glicidil Metacrilato (RET)) e por borracha moída de pneu. (LEITTE, 1999)

Segundo Mano (1986, apud NEGRÃO, 2006) as moléculas que contém um número de átomos encadeados superior a uma centena são denominadas macromoléculas. Tais moléculas adquirem características próprias que passam a predominar sobre as características inerentes a natureza dos átomos que as constituem, essas propriedades decorrem de interações envolvendo segmentos da mesma macromolécula ou de outras.

O termo macromolécula definido anteriormente engloba os compostos de elevado peso molecular, considerando tanto os compostos que apresentam unidades químicas repetidas (polímeros), quanto os compostos de estruturas moleculares mais complexas. (MANO, 1986 apud NEGRÃO, 2006)

Conforme Bernucci (2008), quanto ao seu comportamento frente às variações térmicas, os polímeros são classificados em categorias como:

- **Termorrígidos:** são aqueles que não se fundem, sofrem degradação numa temperatura limite e endurecem irreversivelmente quando aquecidos a uma temperatura que depende de sua estrutura química. Apresentam cadeias moleculares que formam uma rede tridimensional que resiste a qualquer mobilidade térmica. Por exemplo: resina epóxi, poliéster, poliuretano;
- **Termoplásticos:** são aqueles que se fundem e tornam-se maleáveis reversivelmente quando aquecidos. Normalmente consistem de cadeias lineares, mas podem ser também ramificadas. São incorporados aos asfaltos a alta temperatura. Por exemplo: polietileno, polipropileno, PVC;

- **Elastômeros:** são aqueles que, quando aquecidos, se decompõem antes de amolecer, com propriedades elásticas. Por exemplo: SBR;
- **Elastômeros termoplásticos:** são aqueles que, a baixa temperatura, apresentam comportamento elástico, porém quando a temperatura aumenta passam a apresentar comportamento termoplástico. Por exemplo: SBS e EVA.

Partindo dessa definição afirma-se que o polímero do presente estudo, o SBS, é classificado como elastômero, ou seja, depois de aquecido ele torna-se maleável sendo que essa característica é de forma reversível.

Inserir-se neste contexto a utilização de asfaltos modificados com polímeros, que dão à mistura alta flexibilidade, coesão e durabilidade incrementando a resistência dos agregados ao arranque, sob a ação dos esforços tangenciais gerados pelas cargas oriundas do tráfego, ao longo da sua vida útil (ODA & FERNANDES JÚNIOR, 2001).

A utilização de polímeros como modificadores de asfaltos pode reduzir a frequência de manutenção de rodovias e com isso aumentar a vida útil de pavimentos de locais de difícil acesso ou de custo mais elevado de interrupção de tráfego para reparos. Esse aumento da vida útil pode ser explicado pelo fato da adição de polímeros conferir maior estabilidade e elasticidade ao pavimento, além disso, a susceptibilidade térmica acaba sendo diminuída tornando o material mais resistente a variação climática.

De acordo com Fernandes & Lourenço (2013) o uso de asfaltos modificados por polímeros apresentou-se como uma ótima opção para a melhoria de desempenho dos pavimentos e vem sendo amplamente utilizado. Entre as razões para modificar o asfalto com polímero destacam-se: endurecer o ligante e misturas a altas temperaturas de forma a minimizar a deformação:

- Flexibilizar o ligante a baixas temperaturas minimizando a formação de fissuras por efeito térmico;
- Melhora da resistência a fadiga;

- Melhora da coesão entre asfalto-agregado, reduzindo o descolamento de agregado (melhora de adesividade);
- Melhora da resistência a abrasão;
- Melhor resistência ao envelhecimento;
- Permite a formação de filmes mais espessos sobre os agregados;
- Reduz os custos durante a vida útil do pavimento;
- Permite a redução da espessura dos pavimentos flexíveis;
- Redução da suscetibilidade da mistura à água (uma vez que o maior dano da água ocorre pelo deslocamento da camada de ligante da superfície do agregado).

3.5.1 Tipos de Polímeros Modificadores de Asfalto

Atualmente já se utiliza diversos polímeros como modificador de asfalto, conforme mencionado anteriormente, inclusive polímeros da mesma classe do PVC (termoplástico) como os SB, SBS, ABS e EVA. Esses modificadores de asfalto quando adicionados agregam benefícios a mistura asfáltica podendo também melhorar suas propriedades, conforme mostra a tabela 2:

Tabela 2 – Benefícios de diferentes tipos de modificadores de asfalto

Modificador	Deformação Permanente	Trincas Térmicas	Trincas de Fadiga	Dano por Umidade	Envelhecimento
Elastômeros	*	*	*		*
Plastômeros	*				
Borracha de pneu	*	*	*		*
Negro-de-fumo	*				*
Cal				*	*
Enxofre	*				
Modificadores Químicos	*				
Antioxidante					*
Melhorador de Adesividade				*	*
Cal Hidratada				*	*

Fonte: (BERNUCCI et. al., 2008)

Considerando a tabela 2 acima, percebe-se que os modificadores de asfalto conferem principalmente melhoras nas características relacionadas a deformação permanente e melhoras no envelhecimento. E modificadores como os elastômeros e a borracha de pneu confere melhoras quanto ao aparecimento de trincas, tanto como trincas térmicas como trincas por fadiga.

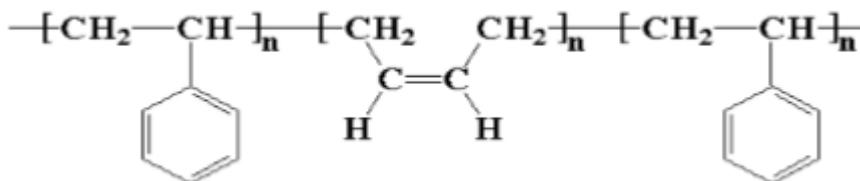
Quanto ao emprego de termoplásticos em misturas asfálticas como o EVA, já existem resultados satisfatórios quanto as melhoras que a adição desse polímero proporciona a mistura asfáltica. Os asfaltos modificados por EVA apresentam elasticidade superior aos demais asfaltos, e a resistência a deformação permanente dos asfaltos modificados por EVA é superior à dos outros asfaltos polímeros.

Um polímero é considerado viável economicamente para ser utilizado como modificador de asfalto se ele for resistente a degradação em altas temperaturas usuais de utilização do asfalto, misture adequadamente com o asfalto e melhore as características de fluidez do asfalto a altas temperaturas, o ligante não deve ficar muito viscoso para a homogeneização e espalhamento e nem rígido ou quebradiço a baixas temperaturas.

3.6 SBS (Estireno-Butadieno-Estireno)

O SBS tem como característica principal sua alta resposta elástica e, portanto, resiste à deformação permanente por alongamento e recuperação. Além disso, possui características de elastômeros termoplásticos, que escoam quando aquecido. Também demonstra apresentar boa resistência mecânica e de resiliência. O grupo estirenobutadieno propicia ao ligante asfáltico um aumento da rigidez, uma resistência ao craqueamento (incluindo o craqueamento a baixas temperaturas), um aumento das propriedades de adesão da mistura, e geralmente é adicionado na faixa de 3 a 6% em peso da mistura (Kuennen, 2005). (Figura 10).

Figura 10 – Estrutura química do polímero SBS



Fonte: (BRINGEL, 2007)

Dentre os tipos de copolímeros SBS os mais significativos são os lineares e os radiais, constituídos por domínios poliestirênicos (que fundem acima de 90 °C) e domínios polibutadiênicos (que se tornam rígidos (vítreos) próximo de -90 °C (DNER, 1998). Com essa informação, pode-se inferir que ele pode ser aplicado tanto em regiões mais quentes como em regiões mais frias.

De acordo com Bringel (2007), em temperaturas elevadas, superiores ao ponto de amolecimento do CAP puro, o SBS, com domínios estirênicos ainda sólidos, forma uma malha que envolve o ligante fluido e mantém a consistência da mistura, evitando que esta apresente fluxo viscoso. Por outro lado, em temperaturas muito baixas, nas quais o CAP puro teria comportamento vítreo e trincaria, o copolímero SBS confere elasticidade à mistura.

3.7 REOB (Re-recycled engine oil bottom)

O termo REOB (*re-recycled engine oil bottom*), tal como utilizado neste documento, refere-se estritamente ao produto residual da destilação a vácuo na torre de re-refinaria de óleo lubrificante usado. REOB é o resíduo não destilável da reciclagem de óleo usado por destilação atmosférica seguida de destilação a vácuo. É um material que vem sendo pesquisado recentemente em aplicações nas misturas asfálticas e que confere características reológicas interessantes a mistura que permite sua aplicação a temperatura ambiente (a frio).

De acordo com o *Texas Department of Transportation* (2015), o REOB é um aditivo que é composto em sua maior parte por enxofre, fósforo, ferro e zinco mas também com quantidades de cálcio, molibdênio e cobre.

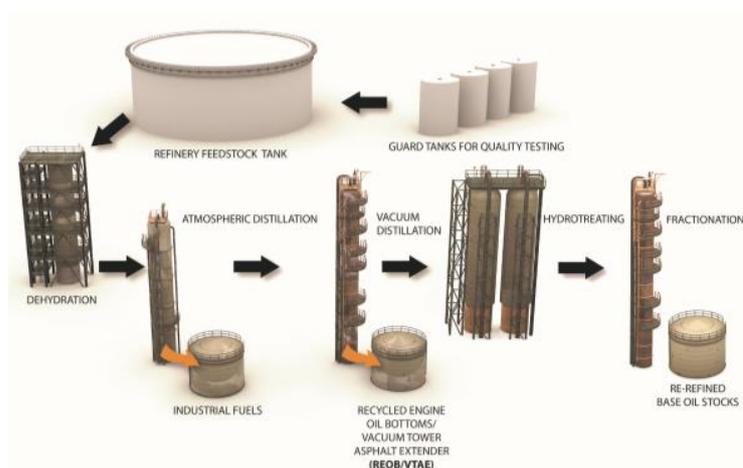
Conforme PALIUKAITE et al (2016), o REOB é um aditivo que está sendo o mais usado no Canadá e no norte dos EUA, aliado ao fato de que é um aditivo de baixo custo e cada vez mais disponível. Ainda de acordo com PALIUKAITE et al (2016), no mundo todo são gerados uma quantidade muito grande de REOB tornando este um problema significativo.

O *Asphalt Institute* (2015) mostra que o asfalto também pode ser modificado com componentes não-asfálticos, tais como agentes de adesão pó de borracha, emulsionantes, polímeros, ácido polifosfórico (PPA), aditivos de mistura quente, óleos vegetais ou parafínicos e REOB (sendo usado tipicamente usado como plastificante).

Os produtores do REOB relatam que seu material foi usado para modificar os asfaltos desde a década de 1980 (diversas funções). Houve um aumento no nível de interesse e uso em REOB nos últimos anos devido a tendência de usar níveis mais altos de concreto asfáltico fresado (RAP), impulsionando a demanda por misturas mais flexíveis. O ligante do CAF é duro e oxidado com isso, estas concentrações mais elevadas de ligante oxidado e frágil exigem alternativas de adição de constituintes que melhoram a plasticidade (ASPHALT INSTITUTE, 2015).

A figura 11 representa o esquema de uma usina que faz o refino do REOB mostrando as principais etapas desse processo.

Figura 11 – Processo de produção do REOB



Fonte: (ASPHALT INSTITUTE, 2015)

Alguns estudos já foram feitos com o uso do REOB em misturas asfálticas, como em Gibson et al. (2015), que relataram o desempenho de ligantes de asfalto e misturas contendo 0, 2,5, 6 e 15% REOB. As misturas foram testadas para danos causados pela umidade, fadiga, resistência à tração indireta e fissuras a baixa temperatura. Verificou-se que concentrações mais elevadas de REOB resultaram em perda de desempenho para o ligante e as misturas de asfalto, enquanto as concentrações mais baixas de REOB apresentaram resultados mistos.

3.8 Defeitos de superfície asfálticas

De acordo com a classificação dada pela NBR 005 (DNIT 2003), os defeitos de superfície em pavimentos são deteriorações superficiais dos pavimentos asfálticos que podem ser observadas a olho nu. Uma análise e levantamento dos defeitos em uma superfície asfáltica permite avaliar o estado de conservação de pavimentos e elaborar um relatório sinalizando uma possível solução técnica adequada para melhorias nas restaurações.

O fenômeno da deformação permanente é um processo complexo, pois é influenciado pelas propriedades e proporções de cada um dos componentes de uma mistura asfáltica como os agregados, ligante e o volume de vazios. Este fenômeno ocorre com mais frequência no verão, pela característica da elevada temperatura e com isso a viscosidade do ligante diminui e o carregamento do tráfego é suportado pelo agregado mineral. A resistência a deformação permanente é caracterizada pela combinação da resistência do agregado e do ligante asfáltico. (FONTES 2009 apud ARAO, 2014)

As classificações dos tipos de defeitos segundo a norma brasileira são:

- Fendas (trincas);
- Afundamentos (deformações permanentes);
- Corrugação (deformações transversais e ondulações);
- Exsudação (excesso de ligante asfáltico);
- Desgaste (desprendimento de agregados);

- Panela ou Buraco (cavidade no revestimento);

Uma das funções da aplicação da técnica de fresagem consiste na correção de defeitos que se formam com o envelhecimento do pavimento. Dentre os principais defeitos destacam-se:

3.8.1 Trincas

Trincas podem ser definidas como fendas existentes no revestimento. Conforme Maia (2012), as trincas isoladas apresentam duas formas, às trincas longitudinais, as quais apresentam direção predominantemente paralela ao eixo da via onde se inserem e as trincas transversais que apresentam direção predominantemente ortogonal ao eixo da via. (MAIA, 2012)

Com a evolução dessas trincas elas se interligam, formando a trinca sem direções preferenciais conhecida como couro de jacaré, ou em blocos, caracterizadas pela configuração de blocos com lados bem definidos, como mostra a figura 12

Figura 12 – Exemplo de superfície de pavimento com a presença de trincas interligadas



Fonte: (NASCIMENTO, 2011)

3.8.2 Afundamentos

O afundamento trata-se da deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada, ou não, de levantamento, podendo

apresentar-se sob a forma de afundamento plástico ou de consolidação. (Figura 13) (DNIT, 2003)

Com o excesso de carga e um solo sem compactação, a malha asfáltica começa a apresentar sinais de seu enfraquecimento, tendo deformações e afundando em alguns pontos onde o trânsito de veículos pesados é maior ou com grande fluxo de automóveis. Outro problema é a forma como esta malha foi feita e recuperada (Operação Tapa Buracos) ao longo dos anos, que fora de forma incorreta. (Roni et al, 2016).

Figura 13 – Representação de um defeito por afundamento numa via



Fonte: DNIT (2003)

3.8.3 Desgaste

De acordo com o DNIT (2003) o desgaste é o efeito do arrancamento progressivo do agregado do pavimento, caracterizado por aspereza superficial do revestimento, como mostra a figura 14:

Figura 14 – Representação esquemática de um revestimento desgastado



Fonte: DNIT, 2003

De acordo com Bernucci et al (2008), este defeito ocorre devido ao desprendimento de agregados da superfície ou ainda da perda de mástique junto aos agregados que provavelmente não eram de natureza totalmente inerte e tão pouco muito facetados.

3.8.4 Painelas ou Buracos

De acordo com Bernucci et al. (2006), a painela ou buraco é uma cavidade no revestimento asfáltico, podendo ou não atingir camadas subjacentes, como mostra a Figura 15. E completa, em local onde há trincas interligadas, com a ação do tráfego e intempéries, pode haver remoção do revestimento ou mesmo de parte da base, além de falha construtiva como a deficiência na compactação, umidade excessiva em camadas de solo, falha na imprimação, desagregação por falha na dosagem ou ainda segregação, são fatores que podem causar o aparecimento desse defeito de maiores magnitudes. Em casos dessa deformidade em pequenas magnitudes, podem ser ocasionados pela falha na pintura de ligação do revestimento.

Conforme especificação da norma DNIT 005 (2003) esse defeito pode ser causado por várias hipóteses como a falta de aderências entre as camadas superpostas, causando o deslocamento das camadas gerando cavidades no revestimento, podendo chegar a camadas inferiores do pavimento, provocando a desagregação dessas camadas.

Figura 15 - Painelas resultantes da deterioração do pavimento



Fonte: (NASCIMENTO, 2011)

As painelas são bastante observadas nas ruas, avenidas e rodovias brasileiras e causam diversos problemas aos cidadãos brasileiros tais como:

- Queda na velocidade das vias;
- Quebras mecânicas;
- Aumento no consumo de combustíveis;
- Aumento do ruído;
- Aumento da emissão de poluentes na atmosfera.

De acordo com Massaro (2005), o que se observa também é que devido aos buracos nas vias, os motoristas muitas vezes são obrigados a fazer desvios para evita-los, aumentando a distância a ser percorrida. E as painelas não reparadas, aumentam seu tamanho até comprometer completamente o pavimento, fazendo com que o custo do reparo da via seja muito maior.

3.9 Remendos

De acordo com Schmidt (2016), remendos são correções na superfície do pavimento. (Figura 16). Podem ser resultado de uma operação “tapa-buraco” buscando minimizar os efeitos de painelas já existentes, ou ainda, serem resultado de alguma intervenção de natureza não estrutural no pavimento, como por exemplo, em casos de vias em que o sistema de esgoto passa sob o pavimento, eventualmente, pode ser necessário

“abrir” o pavimento para possíveis manutenções da tubulação, após finalização do serviço, o pavimento é refeito através de um remendo.

Figura 16 – Remendo na via



Fonte: BERNUCCI et al, 2006

Os remendos são classificados como Remendos Simples, Remendos Compactados e Remendos Permanentes, conforme explicado a seguir, respectivamente.

3.9.1 Remendos Simples

Considerado o método de reparo mais usado, não só no Brasil, mas no mundo como um todo. Consiste no simples lançamento da mistura asfáltica, sem cuidados prévios (limpeza e drenagem) ou posteriores, como a compactação. Apesar de não ser considerada a técnica mais adequada, sua elevada produtividade a torna muito popular entre as obras de restauro de pavimentos, devido também a seu baixo custo, se comparado com as outras técnicas. Tem o nome popular de “tapa-buracos”.

3.9.2 Remendos Compactados

Corresponde a um ajuste ao método de remendo simples, podendo-se produzir remendos de melhor qualidade. Tem-se uma preparação da superfície a ser preenchida com a mistura asfáltica, ou seja, neste caso realiza-se uma limpeza e drenagem no local, bem como uma posterior compactação com as rodas do caminhão transportador da mistura. Geralmente, é recomendável depositar uma quantidade maior de mistura asfáltica da ordem de 3 a 5mm, de modo a permitir que o remendo fique nivelado com o pavimento após a compactação.

3.9.3 Remendos Permanentes

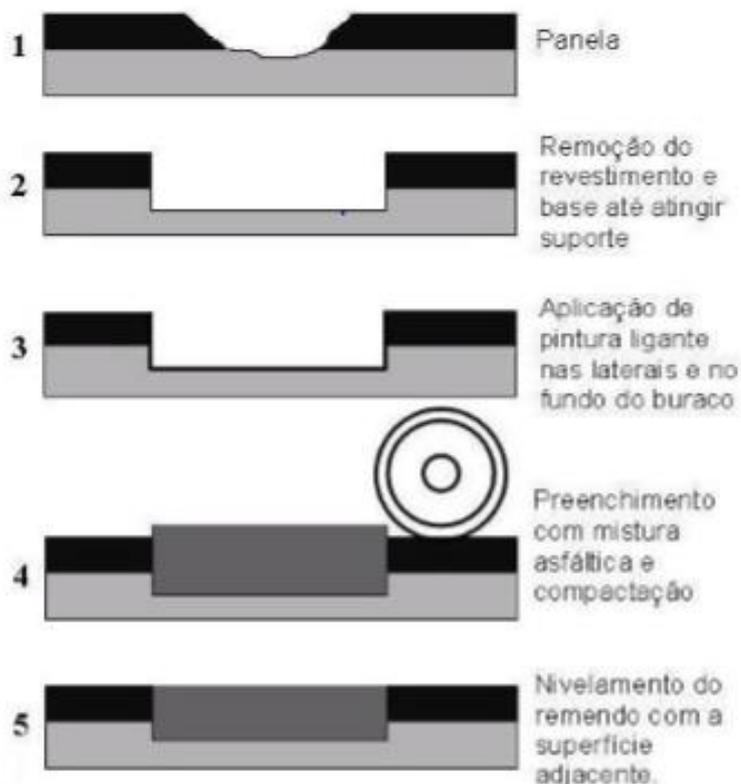
O primeiro procedimento para execução desse tipo de remendo é a remoção de água e sujeira do local. Se a presença de água for a causa do defeito, deve ser efetuada a instalação de drenagem. Depois disso, realiza um corte em forma de retângulo da área a ser remendada. Esta área deve ser delimitada, em torno de 20 cm além das extremidades do buraco, e sua profundidade deve atingir uma camada com material consistente.

O ligante asfáltico é aplicado nas faces laterais e no interior da cavidade, neste caso para impermeabilizar. Deve-se depositar a mistura asfáltica contra as paredes verticais dos cortes, para evitar segregação, e seguir nivelando da extremidade para o centro.

Por fim, realiza a compactação com o equipamento adequado, podendo ser um pequeno rolo compactador pequeno ou uma placa vibratória). Entretanto, o que acontece na maioria das vias urbanas e rodovias brasileiras é uma realidade muito diferente. O que se observa é a execução de “tapa-buracos” por “simples lançamento”, muitas vezes com as cavidades sendo preenchidas sujas e com a presença de água em seu interior.

A figura 17 a seguir mostra um esquema passo a passo de como deve ser feito um remendo de qualidade e o que é necessário para isso.

Figura 17 – Representação esquemática do procedimento de confecção dos remendos permanentes



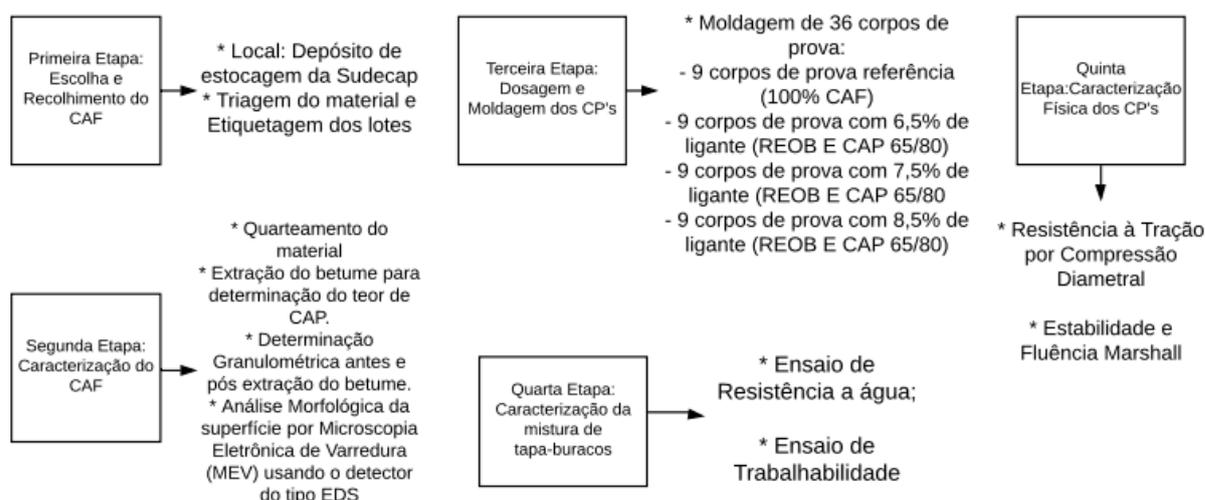
Fonte: (SHRP, 1993a).

A figura 17 mostra os procedimentos básicos de confecção de um remendo. Primeiramente deve-se fazer uma limpeza na cavidade, retirando toda a sujeira. Feito isso, é realizado um corte removendo o revestimento e a base, fazendo com que ela fique em formato retangular, para um melhor adensamento e compactação da mistura. Depois disso é feita uma aplicação de pintura de ligante nas laterais e no fundo do buraco, para uma melhor adesão da mistura. A mistura é despejada no buraco e é compactada, geralmente com as próprias rodas do trator. Por fim, deve-se fazer o nivelamento da superfície até que toda a quantidade de material seja empacotada no defeito.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram selecionados com o propósito de atender o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa. A figura 18 representa o fluxograma do programa experimental desenvolvido.

Figura 18 – Fluxograma de experimentos



Fonte: Próprio autor

Nesta parte é apresentado os principais materiais utilizados no trabalho, sua origem e os procedimentos utilizados para caracterização dos mesmos. O CAF foi caracterizado e posteriormente foram moldados os corpos de prova utilizando o compactador Marshall. Foi definido, para a confecção dos CP's, exemplares sem adição de REOB (plastificante) e CAP 60/85 (ligante), ou seja, somente fresado (CP's referência) e com acréscimos de 6,5%, 7,5% e 8,5% de ligante total (plastificante mais ligante) adicional da mistura.

Considerando o peso padrão do corpo de prova, definiu-se as porcentagens de cada adição partindo desse peso de 1200g e do peso de ligante inicial obtido no Rotarex (5,4%, 65g). Procurou-se manter a quantidade de REOB (plastificante) sempre em 15% do ligante total adicional. A quantidade de cal também seguiu o mesmo procedimento para todos os CP's, fazendo-se uma adição de 1% (12g), exceto para os CP's referência. A dosagem é melhor explicada abaixo:

- CP's referência (65g): 100% fresado
- CP's 6,5% de ligante total (78g): 15% de REOB (12g) e o restante de CAP 60/85
- CP's 7,5% de ligante total (90g): 15% de REOB (14g) e o restante de CAP 60/85
- CP's 8,5% de ligante total (102): 15% de REOB (16g) e o restante de CAP 60/85

A caracterização físico-química ocorreu conforme está mostrado a seguir:

Fresado (CAF):

- Determinação do Teor de Betume;
- Determinação das Curvas Granulométricas;
- Determinação da absorção, densidade real e densidade aparente dos agregados graúdos e miúdos;
- Análise da morfologia da superfície dos fresados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e caracterização microscópica por detector do tipo EDS, instalado na câmara de vácuo do microscópio;

Corpos de Prova (CP's) (Moldados no equipamento Marshall):

Moldagem de 36 corpos de prova, divididos conforme relação de ensaios abaixo:

- Moldagem de 12 CP's para o ensaio de Resistência à tração por compressão diametral. Os 12 CP's foram divididos em 3 CP's para 0,0% de adição de ligante extra, 3 com adição de 6,5% de CAP e REOB, 3 com adição de 7,5% de CAP e REOB e mais 3 com adição de 8,5% de CAP e REOB.
- Moldagem de 12 CP's para o ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall. Os 12 CP's foram divididos em 3 CP's para 0,0% de adição de ligante extra, 3 com adição de 6,5% de CAP e REOB, 3 com adição de 7,5% de CAP e REOB e mais 3 com adição de 8,5% de CAP e REOB.

- Moldagem de 12 CP's para os ensaios de propriedades volumétricas. Os 12 CP's foram divididos em 3 CP's para 0,0% de adição de ligante extra, 3 com adição de 6,5% de CAP e REOB, 3 com adição de 7,5% de CAP e REOB e mais 3 com adição de 8,5% de CAP e REOB.

Criou-se um planejamento experimental para análise do comportamento das misturas compactadas pela metodologia Marshall e também a caracterização do CAF utilizado nessas misturas, para uma análise de suas principais propriedades, bem como seus constituintes, os quais interferem diretamente no desempenho mecânico e estrutural.

Utilizou-se o material fresado com o ligante envelhecido. Um dos objetivos da pesquisa consistiu na reciclagem do pavimento em uma escala de 100% de CAF. Avaliou-se também a adição de pequenas quantidades de ligante novo nas misturas (CAP 60/85 e REOB), com o intuito de verificar possíveis alterações no comportamento mecânico dos CP's moldados e fornecer parâmetro para a definição do melhor custo benefício nas propriedades finais das misturas asfálticas recicladas. Tais adições de ligante se justificam pelo aumento de área superficial dos agregados durante o processo de fresagem.

4.1 Materiais

Nesta seção são mostrados os materiais utilizados no presente trabalho. Primeiramente o CAF (concreto asfáltico fresado), o CAP 60/85, o REOB (*re-refined oil engine bottom*) e a Cal.

4.1.1 Concreto Asfáltico Fresado (CAF)

O CAF utilizado na pesquisa foi recolhido de dois depósitos da Sudecap (empresa responsável pela manutenção das vias em Belo Horizonte e região), uma quantidade na região centro-sul, na avenida do Contorno e outra parte da regional oeste, no bairro Betânia. O material apresentou-se fracionado e homogêneo, devido ao processo de fresagem. (Figura 19).

Figura 19 – Amostra de CAF utilizada



Fonte: Próprio autor

4.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 60/85)

O CAP utilizado foi fornecido pela empresa NTA (Novas Técnicas de Asfaltos). Utilizou-se cerca de 1 litro desse material. Foi adicionado ao CAF cerca de 15% de REOB e porcentagens variantes de CAP 60/85, em relação ao peso total da mistura, a fim de analisar como essas adições modificariam as propriedades mecânicas dos corpos de prova e avaliar a viabilidade econômica para a aplicabilidade proposta do material reciclado.

As especificações técnicas quanto a penetração do CAP 60/85 são mostradas na tabela 3:

Tabela 3 – Especificações técnicas do CAP 60/85

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		Tipo			ABNT/NBR	ASTM
		55/75 E	60/85 E	65/90 E		
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	45-70	40-70		6576	D5
Ponto de amolecimento, min	°C	55	60	65	6560	D36
Viscosidade Brookfield					15184	D4402
a 135 °C, spindle 21, 20 rpm, máx	cP	3000				
a 150 °C, spindle 21, 50 rpm, máx		2000				
a 177 °C, spindle 21, 100 rpm, máx		1000				
Ponto de Fulgor, min	°C	235			11341	D92
Ensaio de separação de fase, máx	°C	5			15166	D7173
Recuperação elástica a 25 °C, 20 cm, min	%	75	85	90	15086	D6084
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 minutos						
Varição em massa, máx (1)	% massa	1,0			15235	D2872
Varição do ponto de amolecimento, máx	°C	-5 a +7			6560	D36
Percentagem de penetração original, min	%	60			6576	D5
Percentagem de recuperação elástica original a 25 °C, min.	%	80			15086	D6084

Fonte: ANP – RESOLUÇÃO N^o 32 DE 21.9.2010

4.1.3 REOB (Plastificante Asfáltico)

O REOB foi fornecido pela Lwart Lubrificantes. Como mencionado na revisão, o REOB refere-se ao produto residual da destilação a vácuo na torre de re-refinaria de óleo lubrificante usado, com uma alta viscosidade, como mostra a figura 20:

Figura 20 – Amostra de REOB adicionada na mistura asfáltica



Fonte: Próprio autor

As especificações técnicas do REOB, como a viscosidade e densidade são mostradas na tabela 4:

Tabela 4 – Especificações Técnicas do REOB

Parâmetros	Unidade	Método	Especificação	Valor Típico
Aparência	-	Visual	-	Líqu. Visc. Esc
Densidade	g/cm ³	ASTM D1298	0,960 – 1,000	0,998
Grau API	-	ASTM D1298	10 – 16	10,3
Visc. Dinâmica a 50°C	Cp	Brookfield	-	26900
Visc. Dinâmica a 60°C	Cp	Brookfield	-	13550
Visc. Dinâmica a 100°C	Cp	Brookfield	-	1890
Teor de Água	%	Destilação	Ausente	Ausente

Fonte: Próprio autor

4.1.4 Cal (Óxido de Cálcio, Cao)

Outra adição realizada na mistura final, foi de cal hidratada. Por ser um material muito fino, exerce a função de fíler, ou seja, preencher os vazios na mistura de concreto.

Conforme Bock (2012), a cal é vista como um aditivo para prevenção de danos causados pela umidade e também como um agente melhorador multifuncional, o qual reduz o envelhecimento químico do ligante asfáltico e com isso, melhora o comportamento dos pavimentos, em relação à trincamento por fadiga e deformação permanente.

Ishai e Craus (1977) complementam que a cal hidratada altera as propriedades superficiais do agregado, consentindo o desenvolvimento de uma composição de superfície e rugosidade mais adequadas à adesão do ligante. Também, as influências químicas entre a cal hidratada e as coligações de ácidos do ligante colaboram para o aumento da resistência ao envelhecimento e ainda, melhoram a adesividade das misturas modificadas (BOCK, 2012).

A cal utilizada no presente trabalho é mostrada na figura 21:

Figura 21 – Amostra de Cal utilizada na mistura asfáltica



Fonte: Próprio autor

Partindo desse pressuposto, entende-se que o uso da cal em misturas asfálticas traz melhorias significativas, viabilizando tecnicamente seu uso a fim de contribuir para modificar as características da mistura.

4.2 Métodos

Neste tópico serão apresentados os experimentos realizados no trabalho, detalhando-se a forma que eles foram executados.

4.2.1 Ensaio de caracterização dos materiais constituintes do CAF e do REOB

Neste tópico são apresentados somente os ensaios de caracterização do CAF. O primeiro ensaio realizado foi a verificação do teor de betume com o auxílio do extrator Rotarex. Foi feito também o ensaio de granulometria do CAF, determinação de

absorção do agregado graúdo, densidade aparente e densidade real dos agregados graúdo e miúdo.

- Obtenção do teor de betume pelo extrator Rotarex atendendo a norma DNER-ME05394 - Misturas betuminosas - percentual de betume;
- Determinação da curva granulométrica conforme ABNT-NBR NM 248 - 2003 - Agregado - Determinação da Composição Granulométrica, DNER-ME083-98 - Agregados - Análise granulométrica e ABNT-NBR NM 46 – 2003 - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem;
- Densidade aparente, real e absorção dos agregados e densidade máxima da mistura (Gmm) conforme as normas ABNT NBR NM 53-2003 e DNER-ME 084/95;
- Utilização do Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para fazer uma análise e inspeção superficial e visual do CAF e caracterização microscópica por detector do tipo EDS instalado na câmara de vácuo do microscópio;

4.2.1.1 Determinação do percentual de Betume

De acordo com Dartora (2015), este ensaio é executado conforme as especificações da norma Misturas betuminosas – percentagem de ligante (DNER-ME 053/94) e utiliza-se o extrator Rotarex a fim de separar os agregados do ligante.

O ensaio foi realizado no laboratório de pavimentos do CEFET/MG e o equipamento disponibilizado foi o extrator de betume do tipo Rotarex, conforme ilustrado na figura 22. O solvente utilizado para a extração foi o tricloroetileno. A amostra continha 1000g de fresado.

Figura 22 – Extrator de betume utilizado no ensaio



Fonte: Próprio autor

O material fresado foi recolhido em campo (no depósito), e foi coletado 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 quarteamento para seleção da amostra ensaiada. Esta técnica seguiu as premissas de DNER-PRO 199/96-Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório.

Um resumo em tópicos do ensaio de teor de betume utilizado é mostrado abaixo, ele seguiu as determinações da norma DNER-ME053/94 - Misturas betuminosas - percentagem de betume:

- Pesagem da amostra e disposição em estufa a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por uma hora;
- Desmanche dos grumos e quarteamento da mistura para obtenção da porção de cerca de 1000g;
- Homogeneização do reagente sobre a amostra, com tempo de espera de 15 minutos;
- Fixação do prato sobre o extrator, com respectivos filtros;
- Acionamento da máquina centrífuga;

- Foi realizado esse mesmo procedimento, com o acréscimo de reagente no sistema até que não foi mais observada na mangueira de saída do extrator a presença de betume;
- O extrator foi interrompido e todo o material foi retirado da máquina extratora e foi reservado para que ocorresse a secagem ao tempo, ficando em repouso por aproximadamente 24 horas;
- Decorrido o tempo, o material foi pesado e anotado a sua massa.

Foi usado aproximadamente 500 ml de solvente para a amostra de 1000g de CAF. Poderia ter sido usado vários tipos de reagentes, tais como gasolina, querosene, tricloro ou percloro etileno, dentre outros, porém, em função da máquina disponível no laboratório do CEFET-MG ser elétrica, não seria aconselhável a utilização de reagentes inflamáveis, sendo assim, foi empregado o percloro etileno, o qual não é inflamável.

Para a obtenção do teor de betume, a norma DNER-ME053-95 aconselha a seguinte equação:

$$\%b = \frac{\text{Peso da amostra sem betume}}{\text{Peso da amostra original}} \times 100 \quad \text{Equação [1]}$$

4.2.1.2 Ensaio de granulometria do CAF com e sem ligante

Para o ensaio de granulometria do CAF (com e sem ligante) e dos agregados virgens foram seguidos os procedimentos da norma ABNT-NBR NM 248 – 2003- Agregados - Determinação da composição granulométrica e ABNT-NBR NM 46-2003-Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.

Inicialmente fez-se o quarteamento do material e uma amostra de 1000g (1kg) de CAF foi pesada. A série de peneiras utilizadas no ensaio foram as da série normal e intermediária, conforme NM 248-2003, como mostra na tabela 5, acrescida da peneira #0,075, a fim de possibilitar a comparação com a curva da faixa “C” do DNIT.

Analisar a quantidade de finos presente no CAF é importante pois eles influenciam nas propriedades mecânicas nos corpos de prova, assunto que será tratado posteriormente.

Tabela 5 – Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria

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

O ensaio de granulometria nos fornece grandezas importantes e que nos auxiliam a entender o comportamento das misturas, uma dessas grandezas é a determinação da dimensão máxima característica, que segundo a norma NM 248, 2003, a dimensão máxima pode ser definida pela peneira que retém uma quantidade acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

Outro dado que podemos calcular com o ensaio é o módulo de finura, que é calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

O ensaio foi dividido em duas partes. O peneiramento fino e o peneiramento grosso. As peneiras #25,0, #19mm, #12,5, #9,5mm, #4,8mm e #2,0mm para o peneiramento grosso e #1,2mm, #0,6mm, #0,42mm, #0,25mm, #0,15mm e #0,075mm para o peneiramento fino. Os materiais retidos foram pesados em balança de precisão de 0,1g.

Para a determinação do teor de umidade tomou-se uma porção de 50g conforme DNER-ME 213/94- Solos Determinação do teor de umidade. Foram feitas uma determinação do teor de umidade.

As curvas granulométricas foram construídas num gráfico utilizando como base os valores retidos em cada uma das peneiras, a fim de poder analisar seu deslocamento em relação às especificações do DNIT.

4.2.1.2.1 Densidade aparente, real e absorção dos agregados e densidade máxima da mistura (Gmm)

A partir da curva granulométrica obtida do material, é possível obter a densidade real, em g/dm³ dos agregados graúdos e miúdos, seguindo orientações das normas ABNT NBR NM 53-2003 e DNER-ME 084/95.

A equação 2 é definida como a densidade aparente dos agregados. A equação 3 ilustra a formulação para obtenção da densidade real dos agregados. E, por fim, para a definição da propriedade de absorção de água, foi utilizada a fórmula também da norma NM 53, conforme equação 4.

$$G_{sb} = \frac{A}{B-C} \quad \text{Equação [2]}$$

Onde:

- Gsb = 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= leitura na balança correspondente ao agregado submerso, em (g) (pesagem hidrostática).

$$G_{sa} = \frac{A}{A-C} \quad \text{Equação [3]}$$

Gsa = Densidade real do agregado.

$$a = \frac{B-A}{A} * 100$$

Equação [4]

Onde:

- a = Absorção de água do agregado definida em percentual

A norma utilizada para determinação da Gmm foi a ABNT 15.619/2012 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Foram utilizadas três amostras do material em picnômetros de 600 mL. Cada amostra foi de 500g.

Aparelhagem utilizada:

- Picnômetro de 600ml com saída superior e tampa de cortiça provida com tubulação de cobre para fixação à bomba de vácuo;
- Balança com precisão de 0,01g;
- Bomba de Vácuo capaz de evacuar o ar do recipiente com uma pressão residual de 4 kPa (30 mm de Hg) com manômetro acoplado;
- Termômetro com precisão de 0,5° C;
- Banho de água (Banho Maria) para imersão do recipiente de vácuo capaz de manter a temperatura constante do meio líquido entre 25±3°C;
- Estufa capaz de manter a temperatura entre 110 ± 5° C;
- Panela, bandeja de alumínio, luvas e fogareiro.

Procedimentos do ensaio:

- Amostra aquecida em estufa por 15 minutos, seguida de aquecimento na panela e fogareiro até a temperatura próxima de 140°C;
- Repousar a mistura ainda quente sobre uma bandeja, e homogeneizando as partículas da mistura com as mãos;
- Após resfriamento à temperatura ambiente, colocar a amostra no picnômetro e promover a pesagem ao ar;
- Adicionar água a uma temperatura de aproximadamente 25°C até cobrir a amostra completamente, dentro do picnômetro;

- Colocar o recipiente com a amostra e água sobre o agitador mecânico e conectá-lo na mangueira proveniente da bomba de vácuo. Ligar o agitador mecânico e iniciar a remoção de ar da amostra pelo aumento gradual da pressão de vácuo até o manômetro indicar uma pressão residual de 30 mm de Hg por 15min;
- Preencher o picnômetro com água de forma a não introduzir ar na amostra;
- Submeter o picnômetro em um banho de água por 10 ± 1 min até estabilizar as temperaturas. Medir e registrar a temperatura da água dentro do frasco;
- Determinar a massa do frasco com a amostra e completo com água.

A determinação da (Gmm) densidade máxima da mistura é feita conforme a equação 5:

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

Equação [5]

Onde:

- A = massa da amostra seca em ar, (g);
- B = massa do recipiente com volume completo com água, (g);
- C = massa do recipiente juntamente com a amostra submersa em água, (g).

4.2.2.1 Determinação das propriedades volumétricas da mistura asfáltica

Após a confecção dos corpos de prova deve-se determinar o que chamamos de propriedades volumétricas da mistura asfáltica, segundo os procedimentos da norma DNER-117/94. Primeiramente determina-se a massa específica da mistura asfáltica compactada (Gmb).

$$Gmb = \frac{Ms}{Ms - Mssub} * 0,9971$$

Equação [7]

Onde:

- Ms = massa seca do corpo-de-prova compactado;
- Mssub = massa do corpo-de-prova compactado submerso em água, (g);

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

Os parâmetros volumétricos volume de vazios (Vv) é obtidos partindo da Gmm, determinada no item 4.2.1.2.1 e da Gmb do corpo de prova, de acordo com as equações a seguir:

$$Vv = 100 \cdot \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad \text{Equação [8]}$$

Onde:

- Gmb = massa esp.aparente do CP, (g/Cm³);
- Gmm = densidade máxima da mistura

Uma outra propriedade que será calculada é o índice de vazios e a absorção de água, definidos pelas normas NBR9778-1987 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica e NBR-9781/2013 - Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio, por esta norma estabelecer um valor máximo para a absorção das peças pré-moldadas.

A equação utilizada para determinar o índice de vazios, segundo a norma é representada abaixo:

$$Iv = \frac{Msat - Ms}{Msat - Mi} \cdot 100 \quad \text{Equação [9]}$$

Onde:

- Msat = massa do corpo de prova saturado, superfície seca;
- Ms = massa seca do corpo-de-prova compactado;
- Mi = massa do corpo de prova saturado, imerso em água.

Os procedimentos experimentais para obtenção dos índices de vazios dos elementos deverão seguir os passos abaixo, adaptado da Norma NBR9778-1987:

- Obtenção da massa da amostra seca ao ar. Em função das características do material constituinte do corpo de prova, o cimento asfáltico, não foi possível mantê-lo em estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$ pois poderia desestruturar o CP, sendo mantida a temperatura de 40°C por 24 horas;
- Pesagem do CP em balança hidrostática para obtenção da massa submersa;
- Imersão dos CP's em água à temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, durante 72 h, sendo que os corpos de prova foram mantidos com 1/3 de seus volumes imersos nas primeiras 4hs, 2/3 nas 4hs subsequentes e totalmente imersos no período restante;
- Obtenção da massa dos corpos de prova saturados com superfície seca após o período de imersão; Para o procedimento, o CP foi colocado sobre uma tela metálica por 1 minuto e removida a água superficial visível com um pano úmido;
- Em seguida foi realizado o procedimento de pesagem dos CP's em balança hidrostática para obtenção da massa do corpo de prova saturado submerso em água.

Já o ensaio de absorção de água nos CP's foi realizado utilizando a norma ABNT NBR-9781/2013. Este ensaio avalia a o quanto o corpo de prova absorveu de água através dos poros, o cálculo é determinado em percentual e corresponde a uma relação entre a massa seca e a massa úmida. Assim como na determinação dos índices de vazios, a saturação dos CP's foi em água à temperatura de $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, e permaneceram nesta condição por 24 h.

A norma NBR-9781/2013 permite para peças de concreto, uma absorção de água com valor médio menor ou igual a 6%, e não são permitidos valores acima de 7%.

O valor da absorção de água de cada corpo de prova foi calculado utilizando-se a equação:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100 \quad \text{Equação [10]}$$

Onde:

- A = é a absorção de cada corpo de prova, expressa em porcentagem (%);

- m_1 = é a massa do corpo de prova seco, expressa em gramas (g);
- m_2 = é a massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

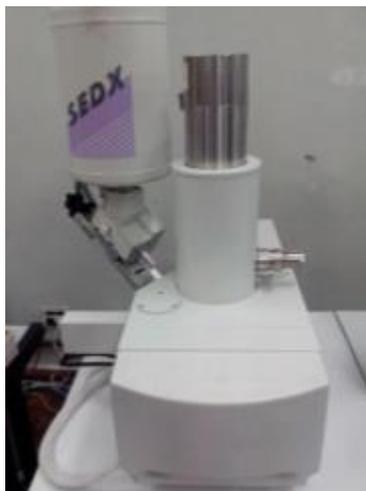
4.2.1.3 Morfologia e caracterização microscópica (MEV) com detector (EDS)

O uso do microscópio eletrônico de varredura foi necessário a fim de avaliar forma, tamanho e a porosidade dos grumos de CAF, bem como a interação entre a interface agregado/CAP, agregados virgens, além da definição dos microconstituintes das amostras. Essas análises ajudarão também analisar qualitativamente a porosidade das amostras.

Assim sendo, as amostras foram divididas em dois grupos, sendo o primeiro obtido do pó solto, constituinte das partículas finas retiradas do fresado, o qual foi preparado com recobrimento de ouro e em seguida analisado no MEV. O segundo grupo de amostras composto por grumos de fresado foi preparado da mesma maneira que os pós, seguido da microscopia. Foram geradas imagens preliminares em diversas ampliações para em seguida definir em quais escalas seriam conseguidas imagens mais nítidas. Após exame preliminar optou-se por ampliações de x100, x500 e x1000, para as amostras do pó e ampliações de x50 para os grumos dos fresados.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi utilizado acoplado com espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS) elétrons secundários marca Shimadzu modelo Superscan SSX – 550 disponível no laboratório do CEFET/MG, conforme figura 23. Foram separados grumos dos três materiais: fresado com ligante, fresado sem ligante e agregados virgens, de aproximadamente 20g, os quais foram dispostos no equipamento Coater, modelo SC-701 Quick Coater, para metalização, através de recobrimento com ouro, conforme figura 24.

Figura 23 - MEV Modelo SSX-550



Fonte: Próprio autor

Figura 24 - Metalizadora Sanyu Electron



Fonte: Próprio autor

Para que se consiga visualizar uma amostra no microscópio eletrônico de varredura, a mesma deve ser condutora elétrica. Com a amostra de fresado não é condutora, ela deve passar por um sputtering, que é um processo em que uma fina camada (a nível atômico) de ouro é depositada sobre a superfície das amostras, formando um filme.

Os procedimentos básicos para realização do ensaio foram:

- Coleta da amostra;

- Separação das amostras em frascos identificando o tipo de material respectivo;
- Fixação ao porta amostras através de fita adesiva apropriada;
- Realização do procedimento de metalização;
- Transporte da amostra metalizada para o porta amostras do MEV;
- Escolha da área de interesse na amostra, ajustando o foco, contraste e ampliação de maneira a se conseguir a melhor imagem.

4.2.2 Ensaios de Inspeção Visual nas Misturas de Tapa Buraco

Foram realizados dois testes usuais nas quatro misturas de tapa buraco, o ensaio de resistência a água e o teste de trabalhabilidade das misturas, os dois ensaios são considerados qualitativos e de inspeção visual.

4.2.2.1 Ensaio de Inspeção Visual de Resistência a água

Em Khandhal (2014), afirma-se que o teste de resistência à água indica se a mistura de remendo tem potencial para desintegração no buraco na presença de água. Se a mistura falhar neste teste, pode significar que um tipo e/ou quantidade adequada de um agente melhorador de adesividade não foi usado no ligante betuminoso.

A norma utilizada no ensaio foi a ASTM D 113, e os procedimentos adotados para realização deste ensaio são mostrados abaixo:

- Pesagem de 50g de cada amostra da mistura de tapa buraco preparados ou retirados de um saco selado
- As amostras devem ser aquecidas a 120°C em um forno de laboratório durante 1 hora;
- E posteriormente arrefecidas até aproximadamente 95°C ao ar;
- Depois disso as amostras devem ser colocadas em 400 ml de água fervente num bquer de 600 ml e agitada com uma haste de vidro na velocidade de 1 revolução por segundo durante 3 minutos;
- Por fim, a água deve ser decantada e a mistura deve ser espalhada sobre um papel absorvente para a observação visual do revestimento.

Nesse caso, a mistura é considerada resistente a água quando ao fim do ensaio, visualmente, os agregados devem estar pelo menos 90% revestido com um filme betuminoso.

4.2.2.2 Ensaio de Inspeção Visual de Trabalhabilidade nas misturas

De acordo com Maher et al (2001), a trabalhabilidade de uma mistura de tapa buraco, está relacionada com a capacidade do material de ser facilmente empilhado e moldado. O fator mais importante que afeta a trabalhabilidade de uma mistura é a temperatura porque controla a dureza dos ligantes betuminosos. Os ligantes de baixa viscosidade podem ser utilizados para melhorar a trabalhabilidade das misturas.

A norma utilizada no ensaio foi a ASTM D2171, e os procedimentos adotados para realização deste ensaio são mostrados abaixo:

- Pesagem de aproximadamente 2,5 Kg da mistura de tapa buracos;
- Arrefecimento das amostras num congelador até que as mesmas atingissem temperaturas próximas de -7° ;
- Após o arrefecimento, a mistura deve poder ser quebrada prontamente com uma espátula com um comprimento de lâmina de aproximadamente 200 mm;
- Se a mistura puder ser quebrada facilmente com a espátula ela pode ser classificada como uma mistura de boa trabalhabilidade.

De acordo com Khandhal (2014), este teste deve ser realizado quando a mistura é produzida. Se a mistura não for viável a -7°C , ela deve ser rejeitada e a composição da mistura deve ser devidamente modificada (por exemplo, aumentando o teor de betume e/ou mudanças de granulometria). Este teste também é aplicável em áreas com clima quente porque amplifica as características de trabalho da mistura usando uma temperatura de teste mais baixa.

4.2.3 Ensaio Mecânicos nos CPs

A metodologia Marshall será o procedimento utilizado para confecção dos corpos de prova. Os ensaios que deverão ser feitos são para determinação da massa específica

aparente da mistura compactada (Gmb), suas propriedades volumétricas, índice de vazios, absorção de água, resistência à tração por compressão diametral, estabilidade e fluência Marshall e módulo de resiliência.

Os procedimentos para a confecção dos corpos de prova são mostrados em tópicos a seguir e na Figura 25:

- O fresado foi pré-aquecido em forno por cerca de 10 minutos a 110°C, de maneira que fosse possível sua fragmentação.
- Posteriormente o CAF foi aquecido em panela até a temperatura aproximada de 140°C, a fim de obter-se uma mistura homogênea.
- O CAP 60/85 foi aquecido e adicionado juntamente com a cal e o REOB, com o objetivo de fazer uma adição 15% de REOB e obter uma mistura CAP/REOB/fresado.
- Depois disso, quando a mistura se tornou homogênea ela ficou um tempo esfriando em tabuleiros, para que fosse moldada a frio (35~40°);
- Na sequência, com mistura já pronta, na temperatura e dosagens corretas, despejou-se o material no molde, o qual foi fixado ao compactador Marshall sendo iniciado o processo de compactação com 75 golpes do martelo, segundo a norma.
- Após a fase de compactação, os CP's foram mantidos nos moldes por 24 horas, sendo desmoldados em seguida com a utilização de equipamento apropriados.

Figura 25 – Representação esquemática da preparação da mistura até a etapa de moldagem do CP



Fonte: Próprio autor

A figura 25 mostra as principais etapas de moldagem de um corpo de prova, desde a preparação da mistura num recipiente adequado até a deposição da mistura asfáltica no molde e compactação da mesma.

4.2.3.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio será baseado na norma DNIT 136/2010 – ME “Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.

É um ensaio desenvolvido por um brasileiro, o professor Fernando Luiz Lobo Carneiro, e que foi usado primeiramente para corpos de prova de argamassa, mas que é usado hoje em dia para misturas betuminosas também. Tem como objetivo determinar a

resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas. O equipamento utilizado para este ensaio e disponível no laboratório de pavimentos do CEFET-MG está representado na figura 26:

Figura 26 – Equipamento utilizado no ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Próprio autor

O ensaio consiste na aplicação de um carregamento de compressão em amostras cilíndricas; o carregamento é aplicado em planos paralelos, diametralmente opostos. Esta configuração de carga, gera um plano de tensões de tração, razoavelmente uniforme no plano perpendicular ao da aplicação da carga. (SPECHT, 2004).

De acordo com Silva (2009) a expressão que representa o resultado da RT é:

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad \text{Equação [7]}$$

Onde:

- σ_R = Resistência a tração (Mpa);
- F = Carga de ruptura (N);
- D = Diâmetro do corpo de prova (Cm);

- H = Altura do corpo de prova (Cm).

4.2.3.3 Determinação da Estabilidade e Fluência Marshall

A estabilidade e fluência Marshall serão determinadas com base nas especificações do método de ensaio da Mistura betuminosa a quente – Ensaio Marshall (DNER-ME 043/95).

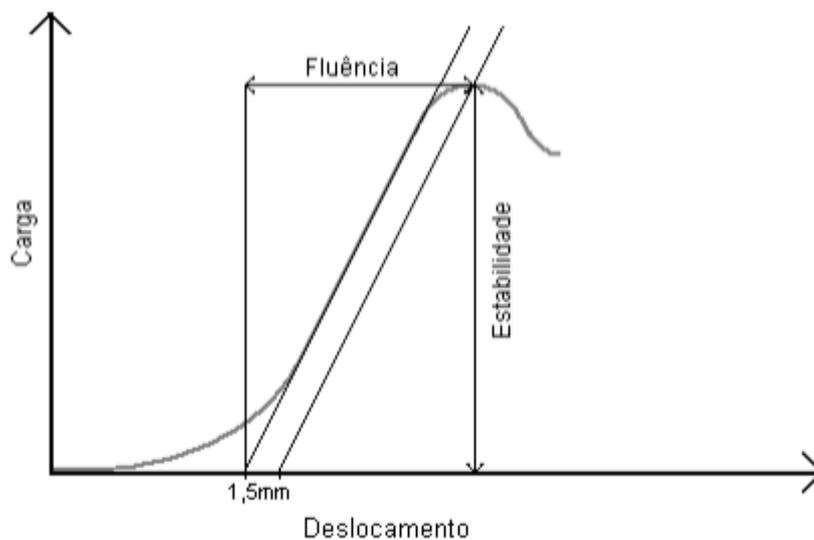
De acordo com Bernucci (2007), a força aumenta até certo ponto em que acontece uma diminuição da estabilidade do material, originada pelo deslocamento ou rompimento de agregados. Sendo assim, a estabilidade Marshall (kgf ou N) se refere à carga máxima correspondente a este ponto e o deslocamento vertical total do prato, correspondente ao ponto de carga máxima, nomeado fluência (mm).

Os valores de estabilidade e fluência são obtidos seguindo os procedimentos da norma ASTM 6927. De acordo com esta norma, a estabilidade e a fluência são determinadas a partir do gráfico que representa a curva carga-deslocamento.

Primeiramente, deve-se traçar uma tangente à parte linear da curva. A intersecção da tangente com o eixo x (deformação) define o ponto inicial para determinação da fluência. Já o ponto final é determinado traçando-se uma paralela à tangente, deslocada 1.5 mm da mesma, e que intercepta a curva.

A fluência corresponde à diferença dos valores de deformação entre os pontos final e inicial. A estabilidade corresponde ao valor da carga indicada pelo ponto final de determinação da fluência, como mostra a figura 27:

Figura 27 – Exemplo de uma curva carga-deslocamento para determinação da Estabilidade e Fluência Marshall



Fonte: David (2006)

O gráfico mostra que a estabilidade Marshall corresponde a carga máxima suportada pelo corpo de prova e a fluência Marshall corresponde a diferença de deformação (em mm) do início da deformação até a deformação correspondente a carga máxima.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta parte são apresentados os resultados com as respectivas discussões acerca da caracterização física do CAF e dos corpos de prova moldados pela metodologia Marshall, obtidos nos laboratórios do CEFET/MG seguindo o planejamento experimental e enumerados conforme baixo:

Caracterização físico-química do fresado (CAF):

- Definição do Teor de Betume;
- Determinação das Curvas Granulométricas;
- Determinação da absorção, densidade real e densidade aparente dos agregados graúdos e miúdos;
- Análise da morfologia da superfície dos fresados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e caracterização microscópica por detector do tipo EDS;
- (Gmm) densidade máxima da mistura;

Posteriormente será feita a caracterização físico-mecânica dos corpos de prova (CP):

- Determinação da (Gmb) densidade aparente do CP, (Vv) volume de vazios, absorção de água e índice de vazios;
- Resistência à tração por compressão diametral;
- Estabilidade e Fluência Marshall;

5.1 Resultado dos ensaios de caracterização do fresado

Os resultados dos ensaios de caracterização do CAF são apresentados abaixo em tabelas, nas quais podem ser visualizados os valores obtidos para o teor de betume, suas curvas granulométricas, densidades, absorção, morfologia e caracterização microscópica.

5.1.1 Determinação do percentual de Betume

Este experimento possibilitou identificar o percentual de betume presente no fresado, sendo o ligante, o elemento que representa a maior parcela de custo nas misturas asfálticas. Foram feitas três medições do teor de betume para posteriormente calcular a média delas, com o respectivo desvio padrão e variância, conforme tabela 6:

Tabela 6 – Teores de Betume para o CAF ensaiados

Amostra (%)	1	2	3	Média	Desvio Padrão	Variância
CAF	5,9	5,6	4,6	5,4	0.555	0.463

Fonte: Próprio autor

Os resultados mostram que o material se encontra dentro da faixa especificada para teores de betume em uma mistura de concreto asfáltico (5,4%), sendo assim definida, conforme o conteúdo da norma DNIT 031/2006 ES, com percentuais variando entre 4,5% e 9,0% para as camadas de rolamento dimensionadas pela faixa “C”.

Na figura 28 a seguir mostra a quantidade pesada de fresado antes do ensaio e após o ensaio na etapa de secagem.

Figura 28 – Amostra de fresado após o ensaio de teor de betume



Fonte: Próprio autor

Conforme Rossato et al. (2014 apud AGUILAR, 2016), em estudo de comparação entre os métodos de extração de ligante, para misturas de referência, encontrou valores superiores aos teores reais, tendo como possíveis causas a perda de finos durante o processo de centrifugação. Fato também estudado posteriormente por

Gonçalves et al. (2015 apud AGUILAR, 2016) reafirmando que os ensaios com extrator Rotarex elétrico leva a valores mais elevados para o percentual de betume em função da perda de finos e ainda conclui que, para extratores Rotarex do tipo manual, esta variação é ainda maior. Entretanto outros fatores também podem levar a variações nos resultados, como a absorção do agregado utilizado na mistura. (ROSSATO et al., 2014 apud AGUILAR 2016)

5.1.2 Ensaio de Granulometria do CAF com e sem ligante

Os resultados do ensaio de granulometria juntamente com as curvas granulométricas dos três materiais analisados são mostrados a seguir. A tabela 7 mostra a porcentagem retida e a porcentagem passante para cada um dos materiais.

Tabela 7 – Granulometria dos Materiais

Peneiras		CAF com ligante			CAF sem ligante		
#	(mm)	M. Ret (g)	% Ret	% Pass	M. Ret (g)	% Ret	% Pass
1 ½"	38,000	0	0	100	0	0	100
1"	25,000	28	1,43	98,57	12	0,60	99,4
¾"	19,000	66	3,36	95,21	88	4,46	94,94
½"	12,700	190	9,62	85,59	110	5,58	89,36
3/8"	9,500	188	9,59	76,00	80	4,05	85,31
4	4,800	470	23,98	52,02	292	14,80	70,51
10	2,000	412	21,02	31,00	336	17,03	53,48
16	1,180	142	7,24	23,76	152	7,70	45,78
30	0,600	168	8,57	15,19	204	10,34	35,44
40	0,425	80	4,08	11,11	130	6,60	28,84
60	0,300	62	3,16	7,95	130	6,60	22,24
100	0,149	60	3,06	4,89	156	7,91	14,33
200	0,075	46	2,34	2,65	108	5,48	8,85
Fundo	-	48	2,44	0	174	8,82	0
Total	-	-	-	-	-	-	-
Módulo de Finura Média		4,24			2,20		
Dim. Máx Caract.		12,6			9,5		
Determinação da Umidade Higroscópica							
Umidade (%)		-			0,60		

Fonte: Próprio autor

A figura 29 a seguir mostra a série de peneiras utilizadas no ensaio. Ao todo foram 13 peneiras da série normal juntamente com a série intermediária. E a figura 30 mostra

o fresado organizado em peneiramento grosso e fino após passagem em todas as peneiras.

Figura 29 – Conjunto de peneiras utilizadas no ensaio



Fonte: Próprio autor

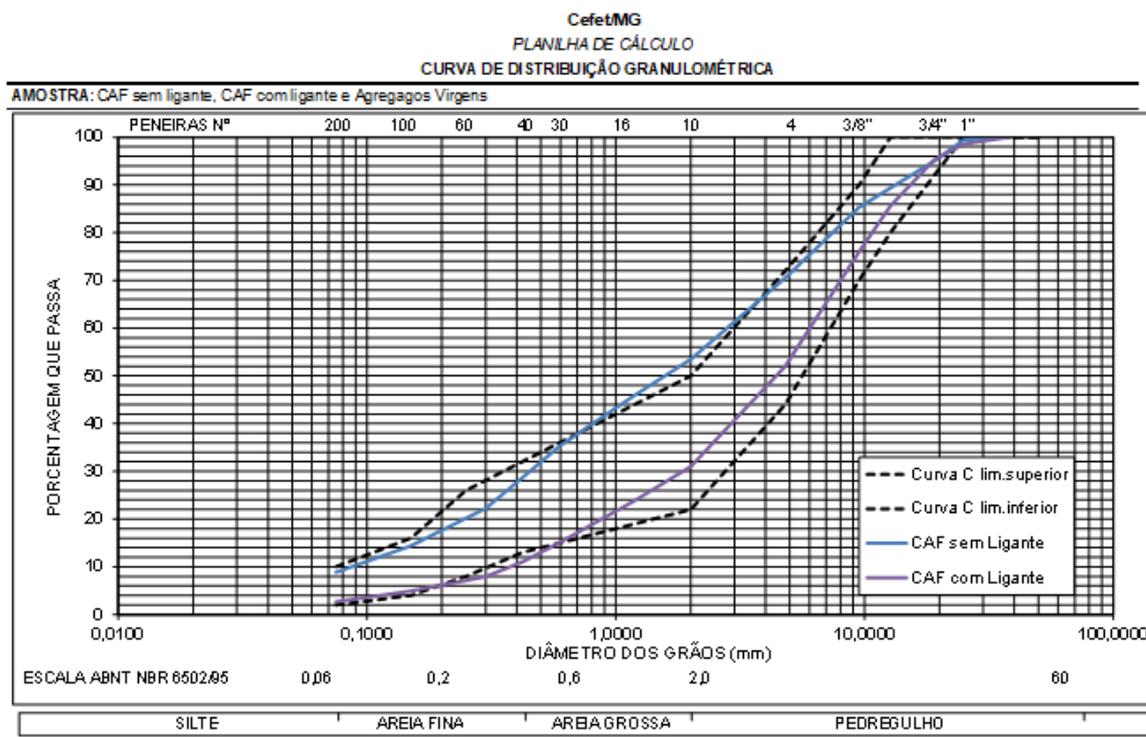
Figura 30 – Material fresado após passagem no conjunto de peneiras



Fonte: Próprio autor

Com os dados da tabela e com auxílio do programa de computador Excel foi possível plotar as curvas granulométricas para os materiais, a fim de poder comparar melhor com a faixa “C” do DNIT, como mostra a figura 31.

Figura 31 – Curvas granulométricas dos materiais



Fonte: Próprio autor

Com a análise preliminar do gráfico pôde-se perceber que as amostras apresentaram uma porcentagem maior de finos em comparação às dosagens de misturas convencionais. O que poderia explicar este ocorrido é o fato do fresado passar por diversas quebras/fraturas durante o processo de fresagem devido principalmente ao tamanho do disco/fresa, formato, profundidade da fresagem e a forma de atuação (se a quente ou a frio) da máquina fresadora sobre o pavimento asfáltico.

5.1.2.1 Determinação da (G_{mm}) da mistura, (G_{sb}), (G_{sa}) e absorção dos agregados

A norma utilizada para determinar as densidades neste ensaio foram as normas ABNT NBR NM 53-2003 e, DNER-ME 84/95, respectivamente. O ensaio de absorção será realizado somente para os agregados graúdos. Os valores médios das densidades nos agregados finos são mostrados na tabela 6.

Para a obtenção da densidade máxima da mistura (G_{mm}) foram utilizados os procedimentos da norma ABNT 15.619/2012 - Misturas asfálticas - Determinação da

densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas e os resultados são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Cálculo da Gmm das Misturas e do Fresado Inicial

Material	Densidade máxima medida (Gmm) média (g/cm ³)
CAF inicial com ligante (5,4%)	2,539
Mistura com 6,5% de ligante	2,527
Mistura com 7,5% de ligante	2,479
Mistura com 8,5% de ligante	2,374

Fonte: Próprio autor

Os valores de Gmm serão utilizados posteriormente para a definição das propriedades volumétricas das misturas compactadas.

A determinação de Gsa, Gsb e absorção dos agregados também foi obtida partindo da norma NBR NM 53-2003 e, DNER-ME 84/95 e os valores são mostrados na tabela 9:

Tabela 9 – Resultados de Gsa, Gsb e Absorção dos Agregados do Fresado

Material	Agregados				Densidade Real (média) Gsa (g/cm ³)
	Graúdos			Miúdos	
	Absorção (%)	Den. Real Gsa (g/cm ³)	Den. Aparente Gsb (g/cm ³)	Den. Real Gsa (g/cm ³)	
Fresado	1,928	2,640	2,513	2,670	2,655

Fonte: Próprio autor

5.1.3 Morfologia e Caracterização Microscópica (MEV) acoplado com EDS

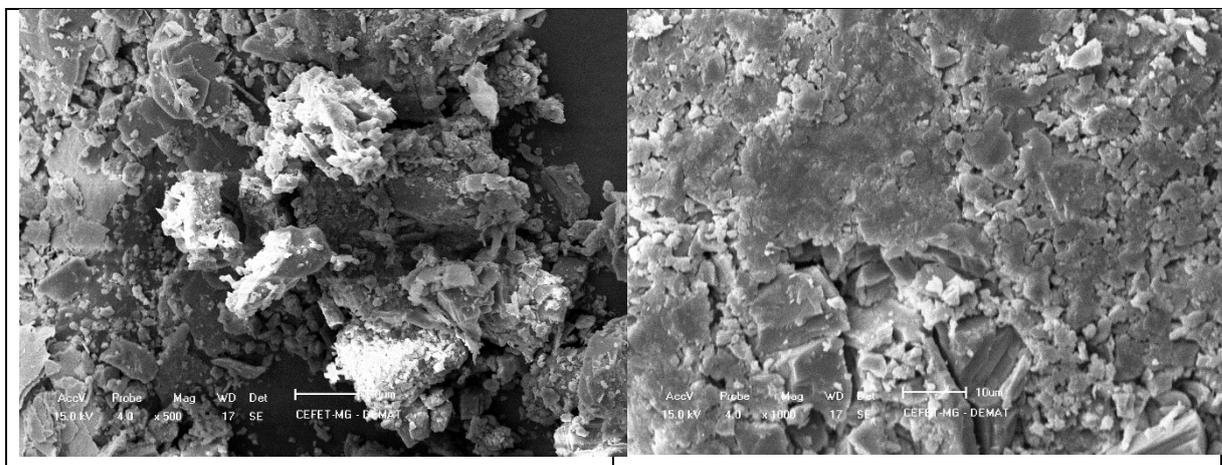
A análise no microscópio eletrônico de varredura, possibilitou fazer diversas imagens para analisar a morfologia dos materiais constituintes da mistura quanto aos agregados finos e a interação com o ligante.

Na figura 32 verificou-se a presença de betume no material particulado solto, indício de uma boa interação entre o ligante e as partículas finas, que mesmo após sofrer processo de fresagem, ainda se encontram traços do ligante aderidos aos agregados. É identificado também o formato dos agregados miúdos que se apresentam com formato angular e bastante irregulares.

Figura 32 – Morfologia dos agregados miúdos do fresado com ligante

X500

X1000



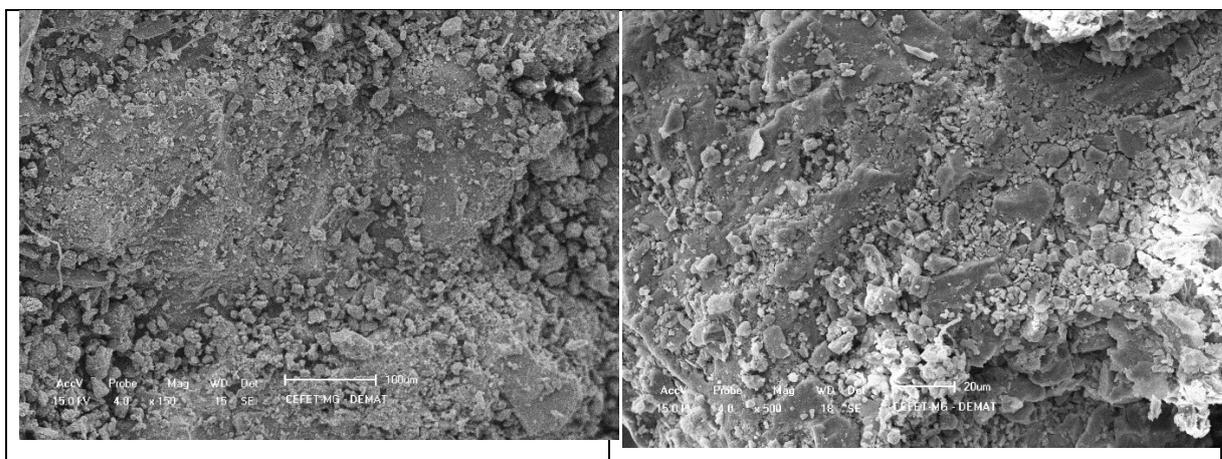
Fonte: Próprio autor

Já na figura 33 é possível observar também um material relativamente fragmentado e com particulados aderidos as paredes dos agregados, confirmando a alta presença de finos, decorrente do processo de fresagem. Poderia ser feita uma comparação entre as imagens obtidas no (MEV) e as curvas granulométricas dos agregados que compõem o CAF, nas quais está bem evidenciado o alto percentual de finos presentes no material.

Figura 33 – Micrografia do fresado com ligante em um aumento menor

(150 X)

(500 X)



Fonte: Próprio autor

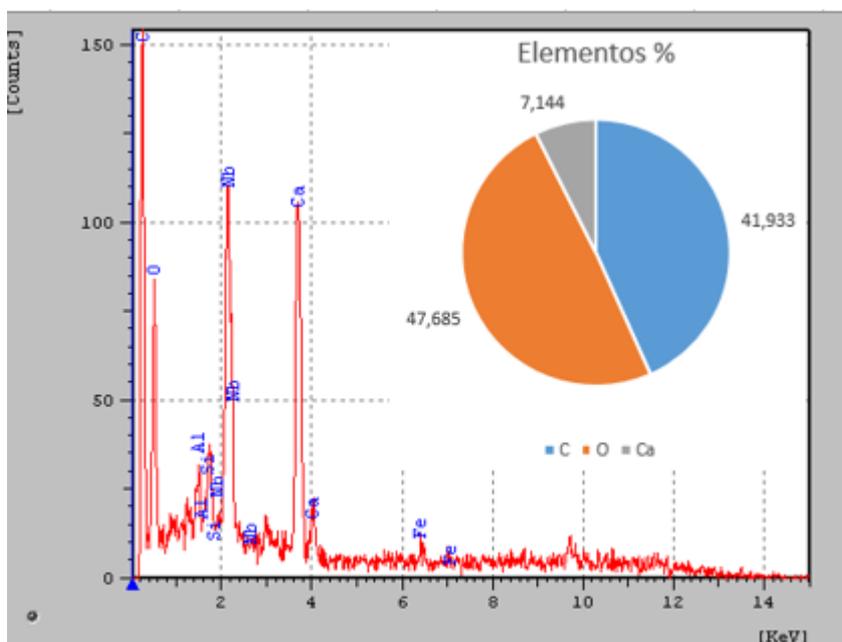
Observa-se também, na segunda imagem da figura 33, uma estrutura fechada, composta por agregados imersos em uma massa de ligante, estrutura bem compacta e densa e de características homogêneas.

Para a caracterização do material com utilização do EDS, primeiramente selecionou-se uma amostra mais homogênea e que não tivesse contaminações visíveis provenientes do solo. Os procedimentos para obtenção dos resultados nesse ensaio foram os mesmos para a análise topográfica, no qual as amostras foram recobertas com material condutor. Porém, o que diferencia este ensaio do anterior é o fato do (MEV) estar sendo usado em conjunto com espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS).

Para execução do ensaio, primeiramente retirou-se uma amostra de grumo aleatória do montante do material disponível para estudo, e foi feita primeiramente observações de uma análise pontual, o que pode levar a variações na identificação dos elementos e seus percentuais, quando comparados a amostras homogeneizadas do montante como um todo. Todavia, para o objetivo da pesquisa, esta análise é suficiente para identificar os constituintes básicos presentes em uma mistura típica de CBUQ oriunda de fresado de asfalto.

Os resultados do ensaio EDS mostrando os elementos químicos identificados são mostrados na figura 34:

Figura 34 – Representação gráfica do ensaio EDS para a amostra do fresado com betume



Fonte: Próprio autor

Através do gráfico percebeu-se grandes porcentagens de carbono e oxigênio, elementos que se constituem como os principais no CAP. Observa-se também o cálcio, típico de rochas utilizadas como agregado na mistura asfáltica.

Tendo em mãos a composição da amostra, é possível supor também que este agregado apresenta características ultrabásicas, representada pela baixa porcentagem de sílica, resultando em um agregado com excelente adesividade ao ligante asfáltico.

5.2 Resultado dos Ensaios nos Corpos de Prova

5.3.1 Ensaios Não Destrutivos

Os ensaios não destrutivos realizados no trabalho foram as propriedades volumétricas, absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova e também ensaios de resistência a água e trabalhabilidade nas quatro misturas analisadas.

5.3.1.1 Resultado das Propriedades volumétricas, absorção de água e índice de vazios

Os resultados das propriedades volumétricas, absorção de água e índice de vazios são mostrados na tabela 10:

Tabela 10 – Resultados das Propriedades Volumétricas dos Fresados e CP's

	Mist. Ref (Fresado)	Mist. 6,5%	Mist. 7,5%	Mist. 8,5%	Correlação	Varição conforme a norma DNIT031/2006
Gmm (g/cm³)	2,539	2,527	2,479	2,374	Mistura	-
Gmb (g/cm³)	2,351	2,387	2,340	2,273	Corpo de Prova	-
Absorção	3,16	6,23	4,94	3,89	Corpo de Prova	≤6% (NBR-9781/13)
Índice de Vazios (%)	5,75	11,72	9,79	7,88	Corpo de Prova	-
Vv (%)	7,404	5,540	5,607	4,25	Rel. Gmm e Gmb	3-5

Fonte: Próprio autor

Com uma análise dessa tabela, pôde-se chegar a algumas conclusões que são descritas a seguir:

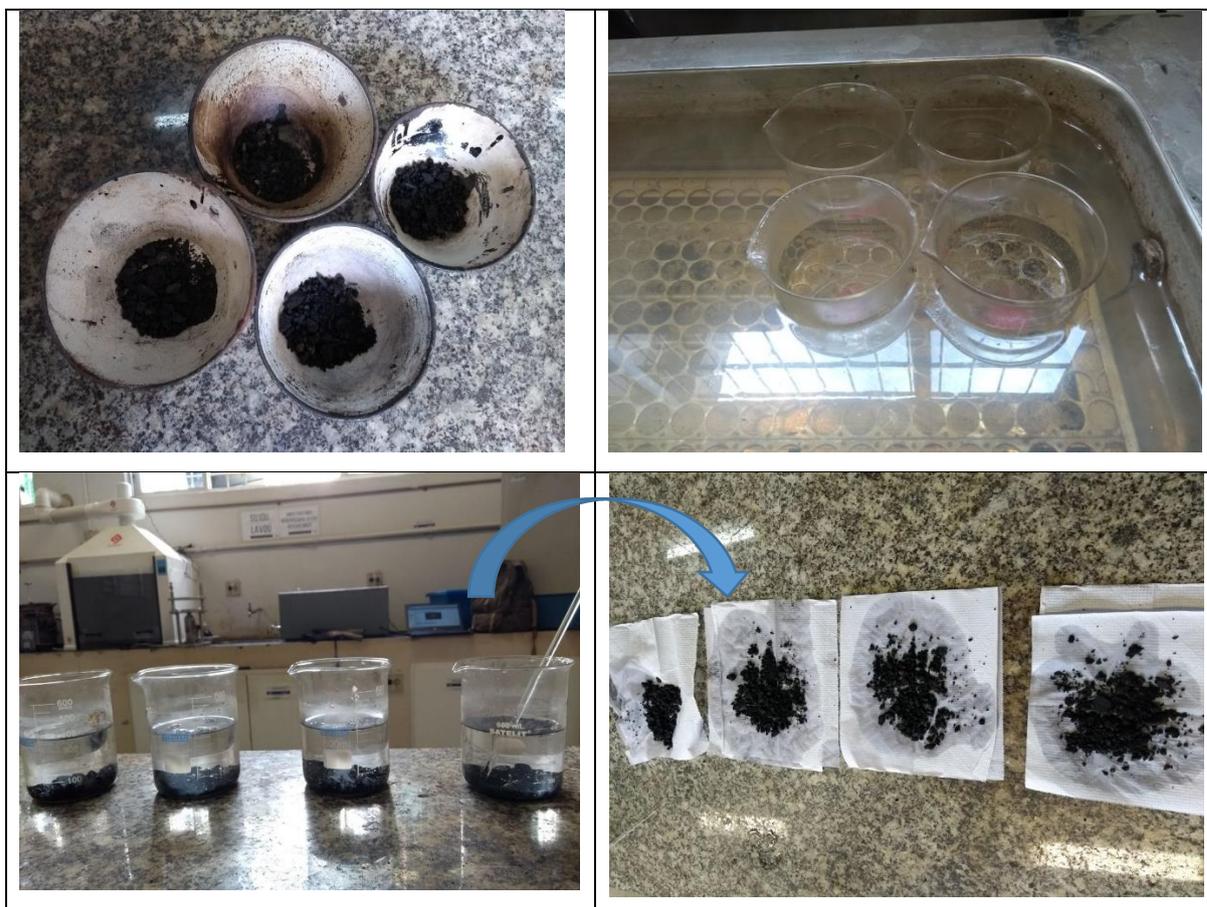
- O valor de Gmm medido no ensaio Rice forneceu valores entre (2,539 e 2,374)g/cm³. É observado que a mistura que possui o menor teor total de ligante, no caso a mistura somente com fresado, foi a que apresentou maior densidade máxima medida;
- Percebe-se também através destes resultados que, ao passo que se aumenta o teor de REOB e CAP 65/80, o volume de vazios (Vv) da mistura asfáltica reciclada decai, isto se dá pelo preenchimento dos vazios pela emulsão asfáltica;
- A medida que se adiciona CAP 60/85 e REOB nas misturas dos materiais, ocorre redução significativa nos índices de absorção, o que pode ser explicado pelo fato do ligante asfáltico auxiliar no fechamento dos poros dos CP's e interação entre os agregados;

- De maneira geral as quatro misturas apresentaram valores aceitáveis de absorção de água e índice de vazios, podendo ser devido ao fato do fresado possuir um teor relativamente alto de finos;

5.3.1.2 Resultado do Ensaio de Inspeção Visual de Resistência a água

Os procedimentos para o ensaio qualitativo de resistência a água das misturas seguiram os procedimentos descritos anteriormente no item 4.2.2.2 e são mostrados na figura 35:

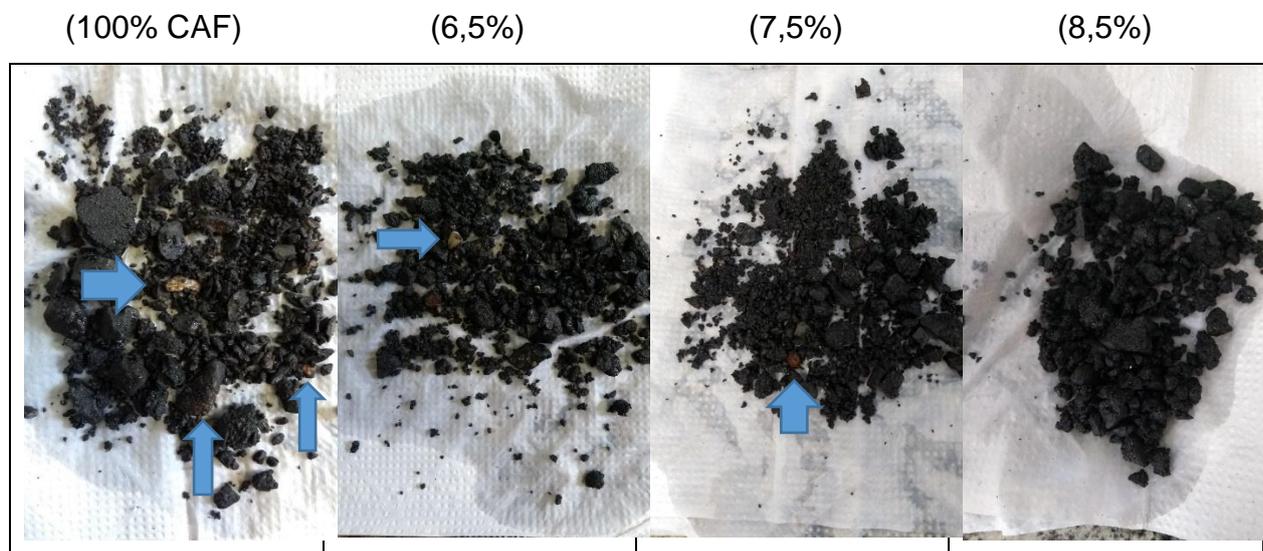
Figura 35 – Representação Esquemática dos Procedimentos para o Ensaio de Resistência a Água das Misturas para Tapa Buraco



Fonte: Próprio autor

Os resultados do ensaio são mostrados separadamente a seguir, na Figura 36. Primeiramente a amostra de 100% CAF seguida da amostra de 6,5%, 7,5% e 8,5%, respectivamente.

Figura 36 – Comparativo das quatro misturas de tapa buraco após o ensaio de resistência a água



Fonte: Próprio autor

A partir da análise das imagens, pôde-se observar que a amostra de 100% CAF apresentou alguns pontos de desprendimento de ligante, como indicado pelas setas, o mesmo aconteceu para a amostra de 6,5%, e em uma menor proporção para a mistura com 7,5% de ligante.

A mistura com 8,5% de ligante manteve-se com a mesma integridade, mostrando que a adesividade do ligante com o agregado foi suficiente. O que pode ter ajudado também, nesse caso, foi o uso do ligante com SBS, que proporciona uma melhor interação agregado/ligante na mistura.

5.3.1.3 Resultado do Ensaio de Inspeção Visual de Trabalhabilidade nas misturas

Os procedimentos para o ensaio qualitativo de trabalhabilidade das misturas seguiram os procedimentos descritos anteriormente no item 4.2.2.2 e são mostrados na figura 37:

Figura 37 – Representação Esquemática das Etapas do Ensaio de Trabalhabilidade das Misturas de Tapa Buraco



Fonte: Próprio autor

De acordo com Khandhal (2014), se a mistura falhar na trabalhabilidade, pode ser devido ao tipo de ligante impróprio, baixo teor de betume, excesso de finos ou granulometria imprópria.

Foi observado que as quatro misturas puderam ser manuseadas e misturadas com a espátula do laboratório após o arrefecimento a -7°C . Não houve aglomeração dos grânulos da mistura e ela manteve sua integridade mesmo após o resfriamento. Pode-se concluir que as quatro misturas tiveram uma boa trabalhabilidade após o ensaio.

Em Khandhal (2014) é citado que alguns fatores influenciam diretamente na trabalhabilidade das misturas de tapa buraco, como por exemplo, o formato e a textura

dos agregados, geralmente agregados arredondados proporcionam uma boa trabalhabilidade. A distribuição granulométrica é outro fator que influencia, índices menores de finos proporciona uma melhora na trabalhabilidade. E por fim, um teor de ligante mais alto na mistura melhora a trabalhabilidade, índices baixos de ligante confere uma baixa coesão.

5.3.2 Ensaios Destrutivos

Os ensaios destrutivos realizados no trabalho foram ensaio de resistência a tração por compressão diametral e o ensaio de estabilidade e fluência Marshall, que são mostrados respectivamente a seguir.

5.3.2.1 Resultados do Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram obtidos através de uma prensa mecânica, conforme DNER-ME 136/2010, na temperatura de 25°C. Na figura 38 é mostrado o corpo de prova já acoplado no equipamento antes de ser ensaiado.

Figura 38 – Corpo de Prova acoplado na máquina de tração por compressão diametral



Fonte: Próprio autor

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos 12 CP's são mostrados na tabela 11 e na figura 40. Cada valor de resistência apresentado corresponde à média de três ensaios realizados na condição seca.

Tabela 11 – Resultados de Resistência a Tração por compressão diametral

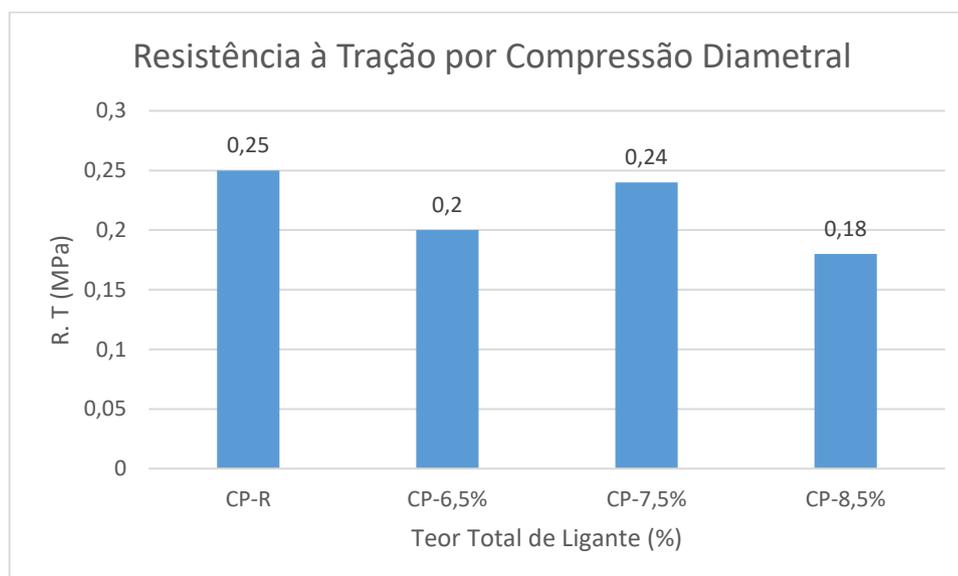
%Ligante	Resistência a Tração por Compressão Diametral (MPa)			Média	Desvio Padrão
CP's-R	0,26	0,34	0,17	0,25	0.085
6,5%	0,20	0,23	0,18	0,20	0.025
7,5%	0,28	0,26	0,18	0,24	0.052
8,5%	0,23	0,18	0,13	0,18	0.050

Fonte: Próprio autor

A norma do DNIT 031/2006 estabelece o valor mínimo de R_T em 0,65MPa para misturas novas. Pode-se observar que a tabela mostra que os valores obtidos estão abaixo desse patamar de aceitação. Os valores obtidos estão em média, 66% abaixo do valor esperado pelo DNIT.

As médias dos valores de resistência a tração de cada porcentagem de adição são mostradas graficamente na figura 39:

Figura 39 – Gráfico de Resistência à Tração por Compressão Diametral



Fonte: Próprio autor

Como observado no gráfico, todas as misturas ficaram abaixo do limite do DNIT de 0.65MPa. O fato desses valores estarem abaixo do permitido pelo DNIT pode ser

explicado por diversos fatores, dentre eles, a granulometria do fresado, a temperatura de compactação, o teor de ligante, dentre outros.

O fresado apresentou uma granulometria mais fina, o que pode ter desencadeado essa diminuição de resistência. Outro fator seria a temperatura de moldagem, misturas a frio geralmente possuem características de resistência e coesão inferiores as misturas a quente.

Comparando os resultados obtidos no trabalho com os resultados de estudos semelhantes de resistência a tração por compressão diametral, percebe-se que os valores obtidos foram similares, como em Cerentini (2016), que obteve valores de R_T variando de 0,24 a 0,26 MPa. Segundo Aguiar e Rocha (2010) em sua pesquisa sobre misturas a frio com agregado de quartzo e faixa granulométrica D (DNER 317/94), os resultados de resistência a tração dos ensaios foram de 0,21 MPa.

Com relação a adição de cal, Pereira (2015), fez um estudo para misturas a frio e concluiu que a adição de 1% de cal aumentou a resistência a tração das amostras de até 36%.

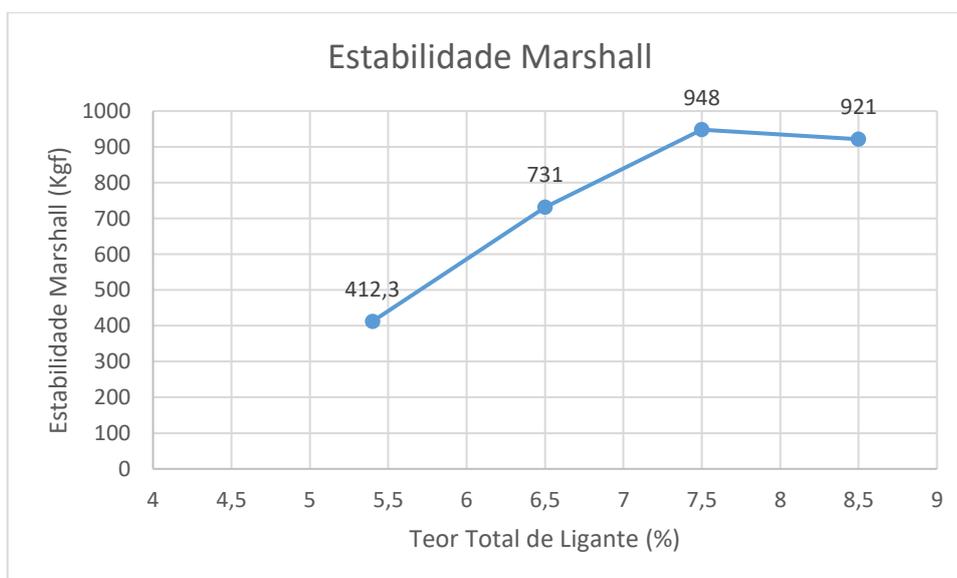
5.3.3 Resultados do Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall

Os resultados de estabilidade e fluência Marshall foram determinados com base nas especificações do método de ensaio da Mistura betuminosa a quente – Ensaio Marshall DNER-ME 043/95, e são mostrados no gráfico 41, e assim como no ensaio de resistência a tração cada valor de estabilidade e fluência Marshall apresentado corresponde à média de três ensaios realizados na condição úmida.

Antes do ensaio, o corpo de prova fica envolto em um molde de aço como mostra a figura 40 a seguir

Figura 40 – Corpo de prova no molde de Estabilidade/Fluência Marshall

Fonte: Próprio autor

Figura 41 – Resultados do Ensaio de Estabilidade Marshall

Fonte: Próprio autor

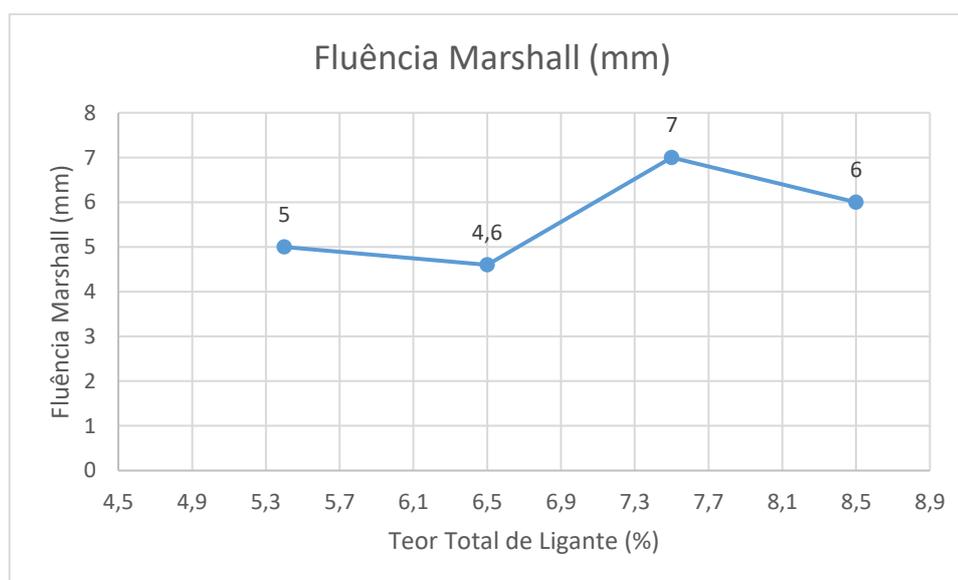
A análise dos resultados para a Estabilidade Marshall é favorável, visto que as amostras apresentaram valores acima do estabelecido pelo DNIT. Considerando que, camadas de rolamento devem apresentar uma estabilidade mínima de 500 Kgf (75 golpes).

Somente a mistura referência, sem a adição de ligante extra e de REOB seria descartada. Este fato poderia ser explicado devido ao fresado possuir um teor de ligante relativamente baixo aliado a uma porcentagem grande de finos.

Comparando os resultados de estabilidade Marshall com outros estudos, percebeu-se que os resultados estão relativamente dentro do que é geralmente obtido. Em Chitolina (2017), os valores de estabilidade para as misturas a quente estão entre 1215 e 1291 Kgf.

Os resultados para Fluência Marshall são mostrados na figura 42, e serão analisados conforma a especificação da norma, que permite uma variação para essa característica entre 2,0 e 4,5 mm.

Figura 42 – Resultados do Ensaio de Fluência Marshall



Fonte: Próprio autor

Os resultados mostram que a mistura de 6,5% de ligante total está dentro do estabelecido pelo DNIT, considerando a proximidade do valor de 4,6 com o limite superior de fluência do DNIT (4,5).

Comparando os resultados de fluência obtidos no presente estudo com os resultados de Santos (2001), percebe-se que eles foram similares na temperatura em que foi realizado o ensaio, com valores variando de 5 a 10 mm.

Acredita-se que os valores acima do permitido para as misturas de 7,5 e 8,5% de ligante seja pelo fato de que quanto maior o teor de ligante na mistura maior a plasticidade.

Segundo Lopes e Kasuga (1976), através do parâmetro de fluência pode-se assegurar uma indicação indireta da flexibilidade da mistura, uma vez que valores elevados de fluência indicam misturas ricas em ligantes que permitem uma maior flexibilidade às temperaturas baixas e maior resistência a fadiga.

5.3.5 Estudo das Propriedades Mecânicas da mistura com 7,5% de ligante total

Levando em conta que a mistura com 7,5% de ligante apresentou resultados melhores, tanto de R_T quanto de Estabilidade Marshall, fez-se um estudo focado nesse percentual específico, considerado o valor de ligante ótimo.

Foram confeccionados 4 CP's com 7,5% de ligante. Em dois deles, fixou-se o REOB em 10% e nos outros dois em 5%. Este estudo possibilitou avaliar melhor a influência do REOB nas propriedades da mistura.

Eles foram avaliados quanto a resistência a tração por compressão diametral e no ensaio de estabilidade e fluência Marshall. Os resultados de R_T são mostrados na tabela 12:

Tabela 12 – Valores de R_T pro estudo da mistura de 7,5%

Teor de Ligante Total de 7.5%	
CP	R_T
5%	0,69
10%	0,66

Fonte: Próprio autor

Conforme mencionado acima, a camada de rolamento deve possuir uma R_T mínima de 0,65MPa, sendo que as duas novas misturas obtiveram valores acima dessa faixa. Portanto, observou-se que, com a diminuição da quantidade de REOB e aumento da quantidade de CAP com SBS a resistência a tração por compressão diametral aumentou.

E com relação a estabilidade e fluência Marshall observou-se também uma melhora nos resultados (Tabela 13).

Tabela 13 – Valores de Estabilidade/Fluência para o estudo da mistura de 7,5%

CP	Teor de Ligante Total de 7,5%	
	Estabilidade Marshall (Kgf)	Fluência Marshall (mm)
5%	1943	3
10%	1722	4

Fonte: Próprio autor

Tanto a estabilidade quanto a fluência Marshall tiveram valores dentro do especificado pela norma do DNIT. O que ajuda a entender melhor a influência da adição de REOB na mistura.

Estudos posteriores devem ser feitos a fim de avaliar melhor a influência do REOB nas propriedades da mistura asfáltica, e conseqüentemente a aplicação a frio também deve ser levada em conta.

Como mencionado, pode-se observar que a adição de REOB e CAP na mistura conferiu uma capacidade de deformação maior, comparado as misturas com menor teor. Acredita-se que a adição desses materiais conferiu a mistura uma maior plasticidade fazendo com que eles se deformassem mais.

6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos no presente estudo, pode-se concluir:

- a) O percentual médio de betume do CAF foi 5,4%, o qual ficou dentro da faixa definida pelo DNIT 031/2006 ES com percentual variando entre 4,5% a 9%;
- b) A curva granulométrica ficou próximo ao limite superior da faixa granulométrica tipo C, demonstrando um percentual maior de finos em relação à média, devido ao processo de fresagem;
- c) As imagens de MEV possibilitaram analisar morfológicamente o material, e contribuíram na investigação para cumprir o objetivo proposto, juntamente com o EDS;
- d) Os resultados de resistência a tração por compressão diametral, para as misturas com 15% de REOB em relação ao peso do ligante total (ligante do fresado + ligante virgem), apresentaram valores médios 66% abaixo do valor mínimo especificado pelo DNIT (0,65 MPa). O valor médio obtido para a resistência a tração por compressão diametral foi de 0,22MPa. Verificou-se que o limite mínimo especificado pelo DNIT (0,65MPa) foi respeitado ao diminuir o percentual de REOB para 10 e 5% (para a mistura com 7,5% de ligante total), onde as resistências a tração foram de 0,66 e 0,69MPa respectivamente. Contudo, acredita-se que a diminuição do percentual de REOB poderá interferir na trabalhabilidade a longo prazo, ou seja, misturas com baixo percentual de REOB poderão ter um endurecimento da mistura enquanto estocada, dificultando uma aplicação e compactação de boa qualidade. Tal aspecto demanda mais investigação para determinação de percentuais adequados de REOB que permitam estocagem e trabalhabilidade dentro de um prazo pré-definido;
- e) Os resultados de estabilidade Marshall apresentaram valores médios de 753,07Kgf (considerando a mistura sem REOB e aquelas com 15% de REOB), valor este acima do mínimo especificado em norma (500Kgf). Apenas a mistura

sem adição de ligante virgem e REOB é que não atendeu a norma, a qual apresentou estabilidade abaixo de 500kgf (412,3kgf). A mistura com 7,5% de ligante total (ligante do CAF + ligante virgem) foi a que apresentou maior valor de estabilidade, 948kgf (com 15% de REOB). Para a mistura com 7,5% de ligante total (ligante do CAF + ligante virgem) a quantidade de REOB foi diminuída para 10 e 5% de REOB, apresentando resultados de 1722 e 1943kgf respectivamente. Assim, pode-se verificar novamente que a diminuição de REOB contribui para a melhoria da resistência do material (diminuição da plasticidade);

- f) A Fluência Marshall deve apresentar valores entre 2 e 4,5mm. A média obtida foi de 5,65 e nenhuma se enquadrou no limite especificado em norma. Acredita-se que a moldagem a frio tenha interferido em tal resultado para a mistura que não teve adição de REOB e ligante virgem, ou seja, a moldagem a frio não permitiu que o ligante asfáltico presente no CAF desempenhasse adequadamente o papel de aglutinante, permitindo uma grande plasticidade do material. Para as demais misturas, além da moldagem a frio, acredita-se que o percentual de 15% de REOB interferiu em tal resultado. As misturas com 7,5% de ligante total e 10 e 5% de REOB apresentaram fluências de 4 e 3mm respectivamente (dentro do intervalo especificado em norma), o que confirma a interferência da quantidade de REOB na plasticidade da mistura.
- g) O Concreto Asfáltico Fresado (CAF) reciclado a quente com adição de REOB e CAP 60/85 para aplicação a frio como material para tapa-buraco pode ser viável, considerando a situação de material confinado em buracos de vias. Diante da maior plasticidade imposta pelo REOB, verifica-se que este material demanda aplicação em locais confinados, como os buracos de pavimentos. Diante da necessidade por estocagem do material, sugere-se uma diminuição do prazo de “validade” do produto e conseqüente diminuição da quantidade de REOB, o que permitirá obter um material com melhores valores de resistência mecânica. A definição de prazo aceitável de estocagem e quantidade de REOB a ser adicionado demanda maiores investigações.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se:

- Utilização de diferentes porcentagens de agregados virgens nas misturas a fim de avaliar se a presença deles poderia melhorar aspectos nas propriedades mecânicas;
- Execução e avaliação de mistura asfáltica para confecção de remendos com CAF de rodovias e de diferentes lugares, a fim de avaliar a influência na mistura do tipo de fresado e do local de obtenção.
- Análise da resistência a compressão dos CP's de forma confinada, ou seja, aplicação de uma carga no corpo de prova envolto em um molde para melhor simular as condições de aplicação do mesmo (buraco).
- Usar um outro material que confere características similares ao REOB, como mostra os estudos, que no caso, é o DOPE.
- Empregar em trechos experimentais, o projeto de mistura asfáltica reciclada que apresentou desempenho satisfatório nos critérios avaliados;

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, G. S. **Blocos intertravados em concreto asfáltico reciclado à quente - contribuição para o estudo de viabilidade técnica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). CEFET-MG. Belo Horizonte, 2016
- ARAO, M. **Análise da vida de fadiga de pavimentos flexíveis em diferentes misturas**. 2014. 5p. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ARAÚJO, L. M. D. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 110p. 2004
- ASPHALT INSTITUTE. **The Use of REOB/VTAE in asphalt**. 2015.
- ASTM D113-17, **Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 720/1982: **Termologia e classificação de pavimentação**. Rio de Janeiro, 1982
- _____ NBR NM 26: **Agregados – Amostragem**. Rio de Janeiro, 2001.
- _____ NBR NM 46: **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.
- _____ NBR 53: **agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2003.
- _____ NBR NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- _____ NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica**, Rio de Janeiro, 1997.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos, restauração**. São Paulo: Câmara Brasileira de Livros, 2007
- BARROS, Rafael F. **Utilização do revestimento fresado da BR-104 como material de reforço da camada de base e/ou sub-base**. Caruaru: O Autor, 2013
- Becker, Y.; Méndez, M. P.; Rodríguez, Y. Polymer Modified Asphalt. **Vision Tecnológica**, vol. 9, n.1, p. 39-50, 2001
- BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 3 ed. 504 p. Reimp. Rio de Janeiro: Abeda, 2008.

BOCK, André Luiz. **Efeito da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BRINGEL, R. M. **Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos**. Dissertação (Mestrado em Química Inorgânica). Universidade Federal do Ceará. Ceará, 2007

BROCHADO, M.M.L. **Estudo da viabilidade do asfalto pré-misturado a frio em rodovias de médio e baixo tráfego**. 2014. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdades de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATEC. Brasília, 2014.

CASTRO, L. N. **Reciclagem a frio "in situ" com espuma de asfalto**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

CERENTINI, N. C. **Dosagem de um pré-misturado a frio utilizando material asfáltico fresado**. Trabalho de Conclusão de Curso. Santa Cruz do Sul, RS. 2016

Companhia Nacional de Transportes. **Relatório CNT do Transportes: Estatísticas consolidadas**. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/Rodoviario/1-1-/Principais-dados>> Acesso em: 14 Jun 2016

CHITOLINA, L. D. **Análise de desempenho de diferentes misturas asfálticas: estudo de caso através da construção de trechos experimentais com pré-misturado a frio e o concreto betuminoso usinado a quente**. Trabalho de Conclusão de Curso. Santa Rosa, RS .2017

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentos rígidos**. Rio de Janeiro: DNIT, 2005.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE
DNIT – ES 031/2006 - **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006.

_____ 136/2010 ME - **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

DNER ME 43: **Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, 1995.

_____ ME 053: **Misturas betuminosas - percentagem de betume**. Rio de Janeiro, 1994.

_____ ME 083: **Agregados - análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1998.

_____ ME 084: **Agregados miúdo determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1995.

_____ ME 117: **Mistura Betuminosa: Determinação da Densidade Aparente**. Rio de Janeiro, 1994.

_____ PRO120 - **Coleta de amostras de agregados**. Rio de Janeiro, 1997.

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

_____ ME 213: **Solos - determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro, 1994.

FERNANDES, M.R.S, LOURENÇO, G.L. **Efeito da adição de polímero e reticulante em propriedades do ligante asfáltico**. Disponível em: <<http://maquinatual.com.br/adm/materias/083cfea3fe9289750515f05ca9872a43.pdf>> Acesso em: 14 Jun 2016

FREIRE, Jéssica et al. **O estado da arte sobre uso de reciclado de pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo**. Disponível em: <<http://www.anpet.org.br/xxviii/anpet/anais/documents/AC401.pdf>> Acesso em: 14 Jun 2016

FONTES, L.P.T.L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Doutorado em Engenharia Civil. Universidade do Minho, 2009.

GARBIN, Kaone. **Utilização do asfalto flexível reciclado microfresado na composição das bases do pavimento utilizando cimento portland**. 2013. 31f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó, 2013.

GIBSON, N., Arnold, T., and Andriescu, A. (2015). **“Quantifying the influence of REOB asphalt pavement materials’ performance.”** Proc., 52nd Petersen Asphalt Research Conf., Laramie, WY.

GONÇALVES, Bruno César Silva et al. **Análise de dispersão de resultados do controle de teor de ligante e granulometria de misturas asfálticas com agregados de baixa absorção a partir do rotarex**. 44ª RAPv e 18º ENACOR. Foz do iguaçu, PR, p. 17. 2015.

IBARRA, J. A. **Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas em caliente em planta**. Barcelona: Tese de Doutorado apresentada à Universidade Politècnica de Catalunya, 232p., 2003.

ISHAI, I.; CRAUS, J. **Effect of the on aggregate bitumam adhesion properties in bituminous mixtures**. Proc. Association Asphalt Paving Technologists 43, pp.228258, 1977.

Kandhal, P.S. **A Simple and Effective Method of Repairing Potholes in India.** Journal of the Indian Roads Congress, Volume 69-3, October-December 2008.

Kuennen, T. Polymer-Modified Asphalt Comes of Age. **Better Roads**, vol. 75, n. 11, p. 70–79, 2005

LEITE, L.F.M, **Estudo de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímeros.** Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1999

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas à quente.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4894/1/2003_dis_atlima.pdf> Acesso em: 14 Jun 2016

MARQUES, G. L. O. **Camadas de pavimentos flexíveis.** Notas de aula, UFJF, Juiz de Fora, 2007.

MENDA, Mari. **Plásticos.** Disponível em: <http://www.crq4.org.br/quimicaviva_plasticos> Acesso em: 14 Jun 2016

MOREIRA, H. S. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a frio com diferentes teores de agregado fresado incorporado e diferentes modos de compactação.** Fortaleza, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Ceará, 99p.

NASCIMENTO, Maria das Vitórias. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas.** Disponível em: <http://www.coenge.ufcg.edu.br/publicacoes/Public_416.pdf> Acesso em: 14 Jun 2016

NICHOLLS, C. **Asphalt surfacings: a guide to asphalt surfacing and treatments used for the surface course of road pavements.** Londres: Transport Research Laboratory, 1996.

NEGRÃO, Douglas Polcaro. **Estudo de asfalto modificados por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos.** Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde.../TeseDouglasPolcaroNegrao.pdf> Acesso em: 14 Jun 2016

ODA, S.; FERNANDES JUNIOR, J.L. **Resultados da avaliação de asfalto-borracha através de ensaios tradicionais e de ensaios da especificação SUPERPAVE.** In: XIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Gramado, RS: Anais, PP. 577-589, 2000

PALIUKAITE, M. et al. **Effect of recycled engine oil bottom on the ductile failure properties of straight and polymer-modified asphalt cement.** Construction and Building Materials. Canadá, 2016

REIS, Ana Carolina da Cruz. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas em usina protótipo de escala reduzida.** 2012-2013. 115f Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Transportes) Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2013

ROBERTS et al. **Hot mix asphalt material, mixture, design and construction**. Maryland: NAPA Education Foundation, 1996.

ROSSATO, F. P et al. **Análise de dispersão de resultados do controle de teor de ligante de misturas asfálticas a partir do Rotarex**. 43º RAPv e 17º ENACOR. Maceió, AL, p.12. 2014

SANTANA, Professor Humberto Santana. **Manual de Pré-misturados a frio**, 1993

SANTOS, M. A. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas a frio via ensaios de laboratório**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2001

SCHROEDER, Élcio Mário; DE CASTRO, José Carlos. **Transporte rodoviário de cargas: situação atual e perspectivas**. 1996. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/>>. Acesso em: 14 Jun 2016

SEGUNDO, I. G. C. et. al.,. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado**. Disponível em: <http://www.cbrcbasvias.com.br/arquivos/Avalia_o_de_Misturas_Asf__lticas_Reci cladas_a_Quente.pdf> Acesso em: 14 Jun 2016

Senço, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: PINI. 174 p., 1997.

SILVA, Luís Francisco Amaral da. **Pavimentos aeroportuários: análise de soluções rígidas e de soluções flexíveis**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade de Aveiro, 2009.

SILVEIRA, L. A. X. **A recuperação do pavimento asfáltico urbano**. Disponível em: <<http://www.unipublicabrasil.com.br/uploads/materiais/7b79b026e4a54ac5634bbf7265d3077d08082017203025.pdf>> Acesso em: 26 Jan 2018

SOUZA, M. J. **Patologias em pavimentos flexíveis**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2004.

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

SCHMIDT, Melissa. **Estudo de patologias em pavimentos asfálticos na cidade de santa maria – rs**. Trabalho de Conclusão de Curso. Santa Maria, RS. 2016

TAKAHASHI, O; HACHIYA, Y. e YAMAGUCHI, S. **Applicability of Recycled Asphalt Mixtures with the Thick-Lift Method for Full-Depth Pavement of Airport Runways**. International Journal of Pavements, Mississippi, pp. 35-44, 2002

TRAMONTINI, Ramone; CHONG, Wang; SPECHT, Luciano P. **Transferência de Calor em Pavimentos Rígidos e Flexíveis**. Ijuí, 2008. Disponível em: http://www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/xxix_cnmac/PDF/461.pdf. Acesso em 20 de maio. 2013.