



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
ÁREA: GEOTECNIA**

Felipe Freitas Santos de Jesus

**ANÁLISE COMPARATIVA DE UMA MISTURA ASFÁLTICA ENSACADA
COMERCIAL COM UM PRÉ-MISTURADO A FRIO E UM CONCRETO ASFÁLTICO**

Campina Grande – PB

2021

FELIPE FREITAS SANTOS DE JESUS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE UMA MISTURA ASFÁLTICA ENSACADA
COMERCIAL COM UM PRÉ-MISTURADO A FRIO E UM CONCRETO ASFÁLTICO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como componente dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil Ambiental

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Campina Grande – PB

2021

J58a

Jesus, Felipe Freitas Santos de.

Análise comparativa de uma mistura asfáltica ensacada comercial com um pré-misturado a frio e um concreto asfáltico / Felipe Freitas Santos de Jesus. – Campina Grande, 2021.

90 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.

“Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena”.

Referências.

1. Geotecnia. 2. Mistura Asfáltica Ensacada. 3. Ensaios Dinâmicos. 4. Curva de Fadiga. 5. Concreto Asfáltico. 6. Dano por Umidade Induzida (DUI). 7. Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS). I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 624.13(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Felipe Freitas Santos de Jesus

Título: **ANÁLISE COMPARATIVA DE UMA MISTURA ASFÁLTICA ENSACADA COMERCIAL COM UM PRÉ-MISTURADO A FRIO E UM CONCRETO ASFÁLTICO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

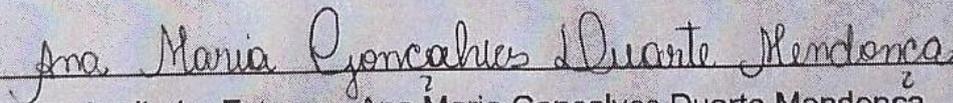
Área de Concentração: Geotecnia

Dissertação defendida e aprovada em: 30/08/2021

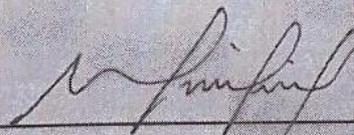
Pela Banca Examinadora:



Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Avaliador Externo: Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça
Instituto Federal da Paraíba - IFPB



Avaliador Externo: Dr. Mário Sérgio de Souza Almeida
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB
Analista em Infraestrutura de Transportes – DNIT

DEDICATÓRIA

A Deus, a meus pais Joselito e Rozilene (*in memoriam*) por todo amor e dedicação. A meu tio (primo) Rozivaldo que sempre acreditou em mim e a meus irmãos Gabriel e Lorena por todo companheirismo.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela sua infinita bondade e misericórdia ao longo de todas as fases da pesquisa

A meus pais Rozilene (*in memoriam*) e Joselito, por toda a educação, criação, cuidado, amor e carinho que me fizeram chegar até aqui, e a meu pai especificamente por todo o esforço, me ajudando até quando não podia.

A meus irmãos, Gabriel e Lorena, que são meus eternos companheiros de todas as horas.

Ao meu tio Primo Rozivaldo, por todo apoio, cuidado e atenção que tem por mim.

À minha vó por todo amor, carinho e orações.

Às minhas primas companheiras do Casos de Família (Juliane, Géssica e Rafaela) por todas as resenhas, distrações e desabafos.

Ao meu primo Pedro Henrique, por todo o companheirismo e amizade.

Ao meu amigo Marcos Couto, por toda a força, amizade, companheirismo e risadas, que me acompanha desde a graduação.

Ao meu orientador, professor DSc. Adriano Elísio, que foi um exímio orientador, me dando todo o apoio, suporte e atenção para a elaboração dessa pesquisa.

A Daniel Beserra do LEP, por toda a disponibilidade e suporte para a realização dos ensaios.

A pesquisadora iniciante Sonaly Rodrigues por toda a disposição e suporte.

Ao meu orientador da graduação prof DSc. Mário Sérgio por toda a atenção, suporte e disponibilidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, pela oportunidade de cursar o mestrado.

À CAPES, pela bolsa concedida para o desenvolvimento deste trabalho.

“E o meu Deus, segundo a sua riqueza em glória, há de suprir, em Cristo Jesus, cada uma de vossas necessidades”.

(Filipenses 4:19)

RESUMO

O aumento da malha rodoviária em todo o mundo, juntamente com a elevação da emissão de gases estufa contribuintes para o aquecimento global, tem requerido do segmento de pavimentação asfáltica inovações quanto aos seus produtos. Com as solicitações dos veículos juntamente com as intempéries, os revestimentos acabam apresentando danos em sua extensão, surgindo então a necessidade de repará-los de forma rápida e eficaz. As misturas quentes, em especial o Concreto Asfáltico (CA), são as que apresentam melhor desempenho mecânico, porém exigem alto controle tecnológico e logístico tornando-as inviáveis para pequenos reparos. Neste contexto, as misturas frias como a Mistura Asfáltica Ensacada (MAE) e o Pré-Misturado a Frio (PMF) surgem como possíveis soluções para serviços como “tapa buracos” por serem de fácil aplicação e exigirem menor gasto energético que o CA para sua execução. Os fabricantes dessa mistura veiculam em seus websites que a MAE é um CA que pode ser armazenado, no entanto, estudos já realizados sobre esta mistura mostraram desempenho inferior da mesma, se comparada ao CA como revestimento asfáltico. Logo, o presente estudo trata de comparar as propriedades físicas e mecânicas da MAE com um PMF e um CA de controle. Para isso, após determinados o teor de ligante e a composição granulométrica da MAE através da extração de ligante, foi encontrado um número de giros padrão no Compactador giratório para as três misturas. Em seguida foram produzidas as misturas de controle, com a mesma composição granulométrica e teor de ligante da MAE. Todos os corpos de prova (CPs) foram moldados no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS). Os ensaios mecânicos realizados foram: Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, Dano por Umidade Induzida (DUI) e fadiga por compressão diametral. A MAE apresentou desempenho mecânico inferior às duas misturas de controle, contrariando o que alguns fabricantes divulgam, sendo o PMF mais indicado para serviços de reparo. Os resultados evidenciam a necessidade de normatização da MAE visto que sua performance mecânica não se aproximou nem de um PMF, não condizendo, portanto, à informação propagandeada sobre este tipo de mistura.

Palavras Chave: Ensaios dinâmicos, Curva de fadiga, Dano por Umidade Induzida, SUPERPAVE

ABSTRACT

The increase in the road network around the world, together with the increase in the emission of greenhouse gases that contribute to global warming, has required innovations from the asphalt paving segment in terms of its products. With the requests of the vehicles together with bad weather, the coatings end up showing damages in their extension, giving rise to the need to repair them quickly and effectively. Hot mixes, especially Asphaltic Concrete (CA), are the ones with the best mechanical performance, but they require high technological and logistical control, making them unfeasible for small repairs. In this context, cold mixes such as Bagged Asphalt Mixture (MAE) and Cold Pre-Mixed (PMF) emerge as possible solutions for services such as "filler holes" because they are easy to apply and require less energy than CA for its execution. The manufacturers of this mixture publicize on their websites that MAE is a CA that can be stored, however, studies already carried out on this mixture have shown inferior performance of the same, if compared to CA as an asphalt coating. Therefore, the present study deals with comparing the physical and mechanical properties of the MAE with a PMF and a CA control. For this, after determining the binder content and the granulometric composition of the MAE through the binder extraction, a number of standard rotations in the Rotary Compactor for the three mixtures was found. Then, the control mixtures were produced, with the same granulometric composition and binder content as MAE. All specimens (CPs) were molded in SUPERPAVE Rotary Compactor (CGS). The mechanical tests performed were: Tensile Strength, Resilience Modulus, Induced Moisture Damage and diametrical compression fatigue. MAE presented lower mechanical performance than the two control mixtures, contrary to what some manufacturers disclose, being the PMF more suitable for repair services. The results show the need for standardization of the MAE since its mechanical performance did not even approach that of a PMF, not matching, therefore, the information advertised about this type of mixture.

Keywords: Dynamic Tests, Fatigue Curve, Moisture Induced Damage, SUPERPAVE

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	15
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivos	17
1.1.1. Objetivos Gerais	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
1.2. Justificativa.....	18
CAPÍTULO 2	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. Misturas Asfálticas	20
2.1.1. Mistura Asfáltica a Quente ou Concreto Asfáltico (CA)	22
2.1.2. Misturas Asfálticas a Frio.....	24
2.2. Mistura Asfáltica Ensacada	30
2.2.1. Vantagens	31
2.2.2. Desvantagens.....	31
2.2.3. Usinagem, execução e armazenamento	32
2.2.4. Estudos Internacionais com a Mistura Asfáltica Ensacada.....	33
2.2.5. Histórico de pesquisas nacionais com a MAE	36
2.2.6. Comentários Finais.....	39
2.3. Serviços de conservação e manutenção de pavimentos asfálticos	40
2.3.1. Remendos	40
2.3.2. Selagem de trincas	42
2.3.3. Recuperações superficiais (Recargas)	42
CAPÍTULO 3	45
3. MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1. Materiais utilizados.....	47
3.1.1. Ligante asfáltico.....	47
3.1.2. Agregados	47
3.1.3. Mistura Asfáltica Ensacada	47
3.2. Métodos	48
3.2.1. Caracterização da mistura asfáltica ensacada	48
3.2.2. Propriedades físicas dos materiais.....	55

3.2.3. Produção das misturas asfálticas de controle	60
3.2.4. Ensaio mecânico.....	62
CAPÍTULO 4.....	69
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1. Propriedades volumétricas das misturas asfálticas.....	69
4.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral	70
4.3. Módulo de Resiliência	73
4.4. Dano por Umidade Induzida (DUI)	76
4.5. Fadiga por compressão diametral	78
5. CONCLUSÕES	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de usinagem.....	21
Figura 2 - Esquema de produção da emulsão asfáltica catiônica	25
Figura 3 - Etapas da dosagem de um PMF.....	28
Figura 4 - Aditivo KA-146U® produzido pela empresa Betunel.....	31
Figura 5 - Processo executivo de aplicação da MAE	33
Figura 6 - Mistura Asfáltica Ensacada EZ Street produzida pela Red Stag Materials	34
Figura 7 - Demarcação e vala para recebimento da mistura asfáltica.....	40
Figura 8 - sequência executiva da operação "tapa-buraco"	41
Figura 9 - Selagem de trincas em pavimento asfáltico	42
Figura 10 - Aplicação da lama asfáltica.....	43
Figura 11 - estrutura do TSS e TSD	44
Figura 12 – Fluxograma da metodologia da pesquisa.....	46
Figura 13 – Agregados graníticos utilizados na fabricação das misturas de controle	47
Figura 14 - Armazenamento da MAE	48
Figura 15 - Destorroamento e quarteamento da MAE.....	48
Figura 16 - Extração de ligante asfáltico da MAE.....	49
Figura 17 - Agregados da MAE após extração.....	50
Figura 18 - Composição granulométrica da MAE e das misturas de controle na curva Fuller	51
Figura 19 - Composição Granulométrica da MAE e das misturas de controle	51
Figura 20 - Compactador Giratório SUPERPAVE	53
Figura 21 - Pesagem submersa de corpo de prova	54
Figura 22 - Percentual de vazios x nº de giros	54
Figura 23 - Massa específica aparente x nº de giros	54
Figura 24 - Fluxograma da caracterização física dos materiais	55
Figura 25 - Viscosímetro Brookfield e resultado do ensaio de viscosidade gerado pelo software do equipamento	56
Figura 26 – Distribuição Granulométrica dos agregados	59
Figura 27 - Dosagem do PMF	61

Figura 28 - Mistura de PMF sem água e com água	62
Figura 29 - Fluxograma de caracterização mecânicas das misturas asfálticas.....	63
Figura 30 - Esquema do ensaio de Resistência a Tração	63
Figura 31 - corpo de prova na UTM-25 durante ensaio de Módulo de Resiliência....	65
Figura 32 - Resistência à Tração das misturas asfálticas	70
Figura 33 - Resultados médios de RT do presente estudo e de diferentes pesquisas com a MAE.....	71
Figura 34 – Valores médios de RT SUPERPAVE do presente estudo com valores médios de RT Marshall de estudos anteriores com o PMF	72
Figura 35 - Módulo de Resiliência das misturas asfálticas.....	74
Figura 36 - Resultados médios de MR do presente estudo e de diferentes pesquisas com a MAE.....	75
Figura 37 - Valores médios de MR SUPERPAVE do presente estudo com valores médios de MR Marshall de estudos anteriores com o PMF	75
Figura 38 - Resistência à Tração Retida das misturas asfálticas.....	76
Figura 39 - Resultados médios de DUI da pesquisa atual e de diferentes pesquisas com a MAE.....	77
Figura 40 - vida de fadiga da MAE e do PMF em função da diferença de tensões...	80
Figura 41 - Modelo de fadiga da MAE e do PMF em função da deformação específica resiliente.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos tipos de PMF em função dos vazios.....	26
Tabela 2 - Granulometria dos agregados da MAE	50
Tabela 3 - Determinação do teor de ligante asfáltico da MAE via Rotarex	52
Tabela 4 - Caracterização da emulsão asfáltica RL-1C realizada pela empresa fornecedora	55
Tabela 5 - Ensaio com a emulsão asfáltica RL-1C realizados pelo autor.....	57
Tabela 6 - Caracterização do CAP 50/70	58
Tabela 7 - Ensaio de caracterização dos agregados.....	58
Tabela 8 - Granulometria dos agregados	59
Tabela 9 - Massa específica e absorção dos agregados	60
Tabela 10 - Equivalente de areia dos agregados miúdos	60
Tabela 11 - Ensaio de caracterização mecânica	63
Tabela 12 - Propriedades volumétricas das misturas asfálticas compactadas com 100 giros no CGS.....	69
Tabela 13 – medidas de dispersão dos valores de RT	73
Tabela 14 - Relação MR/RT de diferentes autores para a MAE	78
Tabela 15 - Modelo de vida de fadiga da MAE e do PMF em termos de diferença de tensões.....	80
Tabela 16 - Modelo de vida de fadiga da MAE e do PMF em termos da deformação específica	80

LISTA DE ABREVIATURAS

- AASHTO** – American Association of State Highway and Transportation Officials
- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANTT** – Agência Nacional de Transportes Terrestres
- ASTM** – American Society for Testing Materials
- CA** – Concreto Asfáltico
- CAP** – Cimento Asfáltico de Petróleo
- CGS** – Compactador Giratório SUPERPAVE
- CNT** – Confederação Nacional do Transporte
- CP** – Corpo de Prova
- DNER** - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
- DNIT** – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- DUI** – Dano por Umidade Induzida
- LEP** – Laboratório de Engenharia de Pavimentos
- MAE** – Mistura Asfáltica Ensacada
- MR** – Módulo de Resiliência
- N** – Número de Ciclos do ensaio de Vida de Fadiga
- NBR** – Norma Brasileira Regulamentadora
- PB** – Paraíba
- PMF** – Pré-Misturado a Frio
- RBV** – Relação Betume x Vazios
- RRT** – Resistência Retida à Tração
- RT** – Resistência à Tração por Compressão Diametral
- SUPERPAVE** – Superior Performing Pavements
- UFCG** – Universidade Federal de Campina Grande
- VAM** – Vazios do Agregado Mineral
- Vv** – Volume de Vazios

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A construção de estradas está em constante crescimento em todo o mundo. No Brasil, 99% da malha viária é rodoviária e constituída de pavimento flexível (CNT, 2017). Esse elevado crescimento da pavimentação rodoviária no mundo ocasiona igual aumento dos gases causadores do efeito estufa, responsáveis pelo aquecimento global.

Neste contexto, as indústrias vêm procurando fabricar produtos menos nocivos ao meio ambiente. Não é diferente no setor rodoviário, que tem tomado medidas para tentar reduzir a emissão de carbono, dentre elas, está a produção das misturas estocáveis, como a MAE e o PMF, que necessitam de um gasto energético para sua produção e aplicação, menor que um CA.

A longo prazo, danos como desprendimento, remoção ou corrosão podem ocorrer no pavimento asfáltico por causa do tráfego crescente e das intempéries, afetando a segurança e o conforto dos veículos. Eles devem ser reparados rapidamente e de forma eficaz a fim de evitar problemas futuros ou agravamento da situação presente (ZHANG; WANG; LU, 2019).

De acordo com a pesquisa da CNT (2019), dos 108.863 Km de rodovias federais estudados nas cinco regiões do Brasil, o número de pontos críticos nas estradas brasileiras passou de 454 em 2018 para 797 em 2019, um aumento de 75,6%. Os serviços de reparo de rodovias no país vêm ganhando relevância, também em virtude da redução de investimentos nas rodovias nos últimos anos. CNT (2021) relata que de 2020 para 2021 a redução no orçamento autorizado para investimentos no setor foi de R\$ 3,2 bilhões.

Os serviços de reparos emergenciais nos pavimentos com o Concreto Asfáltico (CA) são mais complicados, pois, apesar do seu satisfatório comportamento mecânico, exige maiores pré-requisitos para a sua execução como: instalação de usina, alto controle tecnológico e mão de obra qualificada (ARAUJO et al., 2021).

Logo, as misturas asfálticas estocáveis do tipo Pré-Misturado a Frio e Mistura Asfáltica Ensacada (MAE) surgem como uma solução prática e ambiental por serem

de fácil aplicação, não necessitando de mão de obra qualificada, e por poderem ser aplicadas na obra à temperatura ambiente.

GRECA (2013) fabrica a MAE utilizando-se de aditivos no CAP 50/70, que permitem a estocagem do material. Internacionalmente a MAE é conhecida como mistura asfáltica de remendo a frio, *cold patch asphalt mixture*. De acordo com Dong *et al.* (2020), esse tipo de mistura usa o asfalto diluído (*cutback*), e pode ser produzida na própria indústria, lacrada em sacos e transportada para o campo para serem executadas nos reparos à temperatura ambiente. O *cutback* é uma dispersão de asfalto com solvente, que coalescem para formar o filme asfáltico à medida que o solvente evapora.

Oliveira (2017) relata que a MAE é originária da mistura a quente CA convencional, adicionado de um composto químico que retarda o endurecimento do asfalto, gerando diversas facilidades com relação ao CA convencional, tais como: armazenamento, redução da emissão de poluentes, melhoria do ambiente de trabalho, dentre outros. Santana e Lourenço (2017) ainda reforçam dizendo que o produto moderno nasceu como opção para auxiliar na manutenção dos pavimentos, restaurando os defeitos nas vias de forma mais rápida, fácil, barata e eficaz, e até mesmo, pavimentar pequenas áreas.

Porém, Araujo *et al.* (2021) ao estudar o comportamento mecânico da MAE através da metodologia Marshall concluiu que a mesma não cumpriu com as exigências do método de ensaio de misturas a quente determinadas pela especificação de serviço DNIT 31 (DNIT, 2006). Da mesma forma Santana e Lourenço (2017), que constataram que a mistura asfáltica ensacada possui características e propriedades distintas e inferiores às apresentadas pelos fabricantes e além de não ser compatível com um CA, ainda possuem resultados inferiores aos limites mínimos exigidos pelo DNIT. Em sua pesquisa, Oliveira (2017) esclarece a necessidade de aprofundar o estudo sobre este tipo de mistura, visto que a mesma não se comporta como um CA como prometem os fabricantes, nem mesmo como uma camada porosa asfáltica, quando ensaiado pela metodologia Marshall.

Apresentadas as duas alternativas de misturas asfálticas estocáveis, o presente estudo irá comparar o desempenho físico e mecânico da MAE com um PMF e um CA de controle. Como esta mistura se trata de um material ainda novo no mercado, faz-se necessária sua caracterização e análise. Os resultados deste trabalho trarão dados importantes para possível normatização da MAE, pois as únicas

informações que se tem são as fornecidas pelos próprios fabricantes, que em seus meios de comunicação, passam a informação que após a compactação a mistura se comporta como um CA convencional, além dos trabalhos de pesquisa já realizados com o produto e citados anteriormente.

Esta pesquisa apresentará também resultados complementares que serão de grande importância para o estudo do PMF. A dosagem do mesmo tem sido realizada ao longo dos anos através do ensaio Marshall modificado preconizado pelo método de ensaio DNER 107 (DNER, 1994). A compactação giratória proveniente do método *SUperior PERforming asphalt PAVEments* (SUPERPAVE) que será realizada neste estudo, surge então como forma de avaliar o comportamento do mesmo quando compactado por amassamento.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos Gerais

O objetivo principal deste trabalho é verificar o comportamento físico e mecânico de uma Mistura Asfáltica Ensacada em comparação às misturas asfálticas do tipo PMF e CA.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar a granulometria e teor de ligante da mistura ensacada avaliada no presente estudo;
- Produzir as misturas de PMF e CA, adotando a granulometria da mistura asfáltica ensacada como referência;
- Definir um número de giros padrão no Compactador Giratório Superpave (CGS) para a compactação da MAE, PMF e CA;
- Comparar as propriedades mecânicas da MAE com o CA e o PMF, através dos ensaios de mecânicos de: Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR), Dano por Umidade Induzida (DUI) e Fadiga por Compressão Diametral.
- Comparar as propriedades mecânicas do PMF moldado no CGS com PMFs de estudos anteriores moldados pelo compactador Marshall.

- Verificar para qual tipo de mistura asfáltica (PMF ou CA) as propriedades físicas e mecânicas da MAE se aproximam.

1.2. Justificativa

De acordo com o procedimento do DNIT 006 (DNIT, 2003), uma das mais severas patologias no pavimento asfáltico é a ocorrência de buracos. Eles podem ser desenvolvidos localmente e são criados devido a falha de base ou subleito, drenagem deficiente e mão de obra deficiente durante a construção (BYZYKA; RAHMAN; CHAMBERLAIN, 2018). Com este defeito sendo cada vez mais crescente, e a rápida necessidade de liberação do tráfego diante de uma manutenção, a MAE surge como alternativa para as operações “tapa-buraco” por estas serem atrativas, quando da utilização em pequena escala, em função da praticidade.

É válido ressaltar que para um serviço de reparo de grande escala, a MAE terá um custo mais elevado em relação ao CA. O preço médio da tonelada de CA no Nordeste está custando em média 400 reais, informação obtida diretamente das usinas de asfalto. Precificando a MAE nos sítios de busca na internet, atualmente, o valor médio do saco de 25 kg está de 30 reais. Mesmo adicionando-se o preço de transporte do CA, a tonelada da MAE, equivalente a 40 sacos, custaria bem mais que a do CA. No entanto, em situações emergenciais e pontuais, a MAE encontra-se em posição de destaque por causa do seu fácil manuseio e aplicação.

Os fabricantes promovem a informação de que a mistura é um CA aplicado a frio, garantindo a facilidade de execução de um PMF e a durabilidade de um CA. Porém os estudos presentes na literatura que se apresentam de forma mais detalhada no item 2.3.5.3, apontam certa incoerência neste tipo de afirmação, onde a mistura ensacada não atinge sequer os requisitos mínimos estabelecidos pela especificação de serviço DNIT 31.

Deste modo, a motivação para esta pesquisa é que os resultados sirvam de subsídio para a construção de uma especificação técnica referente à MAE, norteados desta forma, os órgãos rodoviários, além de enriquecer o arcabouço teórico sobre este tipo de mistura que é escasso.

Com uma normatização para a mistura asfáltica ensacada pretende-se que os reparos nos pavimentos se tornem mais eficazes. Dessa forma, este estudo e os

demais que poderão surgir, trarão importantes informações acerca das características físicas e mecânicas do material.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Misturas Asfálticas

Devido às intensas atividades industriais no início do século 19, a composição da atmosfera começou a ser modificada. Essas atividades aumentaram a emissão de dióxido de carbono e de diferentes gases favoráveis ao efeito estufa, resultando no célere aquecimento do clima. Por intermédio do Protocolo de Kyoto os países signatários assumiram o compromisso de reduzir, por meio de várias medidas, a quantidade de gases perigosos liberados na atmosfera. Dentre essas medidas estava o setor de construção de rodovias e produção das misturas asfálticas.

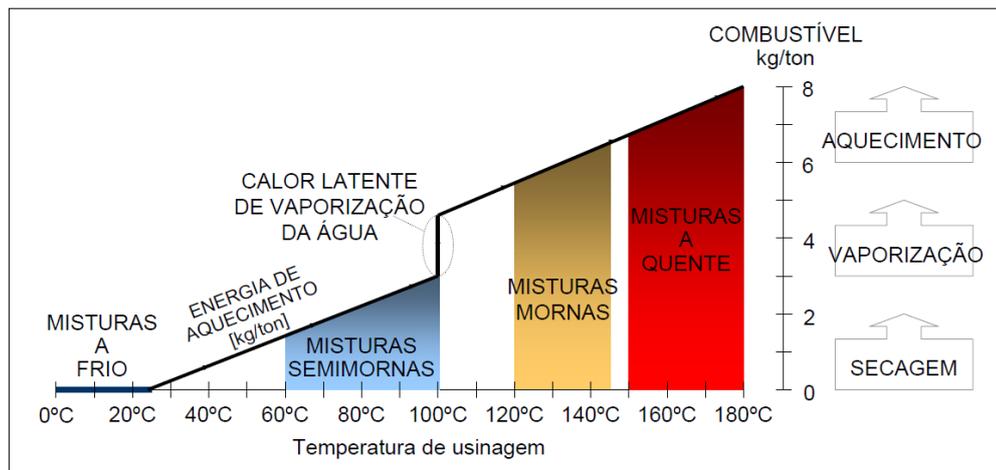
A construção de pavimentos asfálticos é dividida em três etapas: usinagem da massa asfáltica, espalhamento e compactação. A maior quantidade de materiais nocivos ao meio ambiente é emitida durante a produção de asfalto: partículas sólidas, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, formaldeído, pentóxido de vanádio e compostos orgânicos voláteis. A quantidade de emissões perigosas está diretamente relacionada à temperatura de produção da mistura asfáltica e ao combustível consumido pela usina para atingir a temperatura asfáltica exigida (VAITKUS; PERVENECKAS, 2009).

Os pavimentos flexíveis são compostos pelas misturas asfálticas. Segundo Bernucci *et al.* (2008) os pavimentos flexíveis são formados por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros.

Os pavimentos brasileiros são constituídos em sua grande maioria de revestimentos compostos por mistura de agregados minerais de tamanhos variados com ligantes asfálticos. A correta dosagem destes dois componentes proporciona à mistura asfáltica impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local. (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Motta (2011) classifica as misturas asfálticas de acordo com a temperatura de aplicação em misturas frias, misturas semimornas, misturas mornas e misturas quentes. A Figura 1 apresenta a classificação das misturas asfálticas em função das temperaturas, do consumo de combustível e a variação da energia consumida durante a usinagem durante o aquecimento das mesmas.

Figura 1 - Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de usinagem



Fonte: Motta (2011)

Nas misturas à frio, os agregados são empregados sem aquecimento, ou seja, à temperatura ambiente (20 e 50°C), sendo o ligante a emulsão asfáltica ou asfalto diluído. Esse tipo de mistura é bastante utilizado no Brasil em revestimentos de vias urbanas sujeitas à baixo volume de tráfego, em camadas intermediárias e em serviços de regularização de revestimento. Dentre as misturas a frio destacam-se o PMF e o Microrrevestimento Asfáltico (MRAF).

Entre as temperaturas de usinagem das misturas quentes e misturas frias estão as misturas mornas e semimornas, possuindo esta última, temperatura de usinagem inferior a 100°C. Mesmo com o intervalo da temperatura de produção abaixo da mistura quente, se faz necessário para a produção das mesmas o aquecimento parcial dos agregados.

Com usinagem entre 150 e 180°C estão as misturas quentes. Estas são utilizadas em rodovias de tráfego elevado pois apresentam bom desempenho quando submetidas à altas solicitações de cargas. Dentre as misturas quentes destaca-se no Brasil o Concreto Asfáltico (CA).

Para a dosagem das misturas asfálticas, a metodologia de dosagem mais utilizada no mundo é a dosagem Marshall. A denominação faz referência ao engenheiro Bruce Marshall que o desenvolveu na década de 1940 (BERNUCCI et al., 2008). Este método se baseia na compactação por impacto de um soquete padronizado que cai a uma altura padronizada. No Brasil, é padronizado pela norma DNER-ME 043/95.

Porém, a compactação por impacto do ensaio Marshall não reproduz o que acontece quando o revestimento asfáltico é submetido ao tráfego. Por isso, o SUPERPAVE desenvolvido pelo Strategic Highway Research Program (SHRP) em pesquisa aplicada por 5 anos (1987 e 1992) e que custou cerca U\$ 150 milhões, desenvolveu um novo método de dosagem onde são consideradas as condições climáticas e ambientais prevaletentes bem como a faixa de temperatura em um local específico. O envelhecimento a curto e longo prazo, que normalmente ocorrem durante usinagem, aplicação e durante a vida útil dos pavimentos de asfalto, também são simulados. Os ensaios e as especificações de ligantes asfálticos objetivam incluir ligantes não modificados e modificados. Todo o processo de avaliação é baseado no desempenho do pavimento (AL-KHATEEB; AL-AKHRAS, 2011).

A metodologia SUPERPAVE consiste então em estimar um teor provável de projeto através da fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados disponíveis. Neste tipo de dosagem, a compactação ocorre por amassamento da mistura (BERNUCCI et al., 2008).

2.1.1. Mistura Asfáltica a Quente ou Concreto Asfáltico (CA)

As misturas asfálticas quentes são constituídas por agregados de tamanhos variados juntamente com o ligante Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). A temperatura de usinagem apropriada deve estar de acordo com a curva de viscosidade do ligante.

A indústria de pavimentação asfáltica usa o CAP como o principal agente de ligação para o CA, que é o principal material em mais de 99% das estradas em todo o mundo (UNDERWOOD & KIM, 2015). Bernucci *et al.* (2008) relata que como o CA é uma mistura com composição granulométrica bem graduada, a mesma não deve possuir elevado teor de ligante.

De acordo com a especificação DNIT 031/2006 a mistura deve ter teor de ligante de 4 a 9,5% para camada de rolamento da faixa C, e 4 a 7,5% para a faixa B. Além disso, a referida norma relata que a mistura deve conter volume de vazios de 3 a 5% para camada de rolamento e 4 a 6% para camada de ligação.

BERNUCCI *et al.* (2008) classifica as misturas asfálticas a quente de acordo com a graduação dos seus agregados como:

- Graduação densa: Curva granulométrica contínua e bem-graduada deixando assim a matriz esquelética com poucos vazios. Exemplo: Concreto Asfáltico;
- Graduação aberta: A curva granulométrica da mistura é constituída por agregados que possuem dimensões semelhantes. Desta forma, a sua matriz esquelética possui maior quantidade de vazios. Exemplo: Camada Porosa de Atrito (CPA);
- Graduação descontínua: A proporção de agregados graúdos sobressai em relação aos demais agregados, propiciando desta forma maior resistência à deformação permanente, pois o contato grão a grão se dá entre as partículas de maior dimensão. Exemplo: *Stone Mix Asphalt* (SMA).

Balbo (2007) considera o Concreto Asfáltico, a mais comum e tradicional mistura asfáltica a quente empregada no país, sendo utilizado na construção dos revestimentos de pavimentos, incluindo as capas de rolamento e camadas de ligação (binder).

Segundo a norma de especificação de serviço DNIT-ES - 031/2006, que define a sistemática a ser empregada na execução de camada do pavimento flexível de estradas de rodagem, o Concreto Asfáltico é a mistura executada a quente, em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado graduado, material de enchimento (fíler), se necessário, e cimento asfáltico de petróleo, espalhada e compactada ainda quente.

Devido ao seu baixo índice de vazios, o CA possui textura lisa; alto desempenho mecânico quando submetido a altas solicitações de carga e elevada impermeabilidade, sendo, portanto, aplicado majoritariamente nas vias brasileiras de tráfego pesado.

Entretanto, além de não poder ser estocado, o CA requer mão de obra qualificada para aplicação; equipamento adequado para o processo de mistura e aquecimento do material e transporte adequado para o local da obra. Dessa forma

este tipo de revestimento possui um preço de fabricação e aplicação elevado, o que inviabiliza a sua aplicação em pequena escala.

Preparado à temperaturas muito altas, que chegam inclusive a 190°C, o CA traz consigo desvantagens também relacionadas ao meio ambiente, através da produção de gases favoráveis ao fenômeno do efeito estufa durante a sua produção (JAIN; SINGH, 2021).

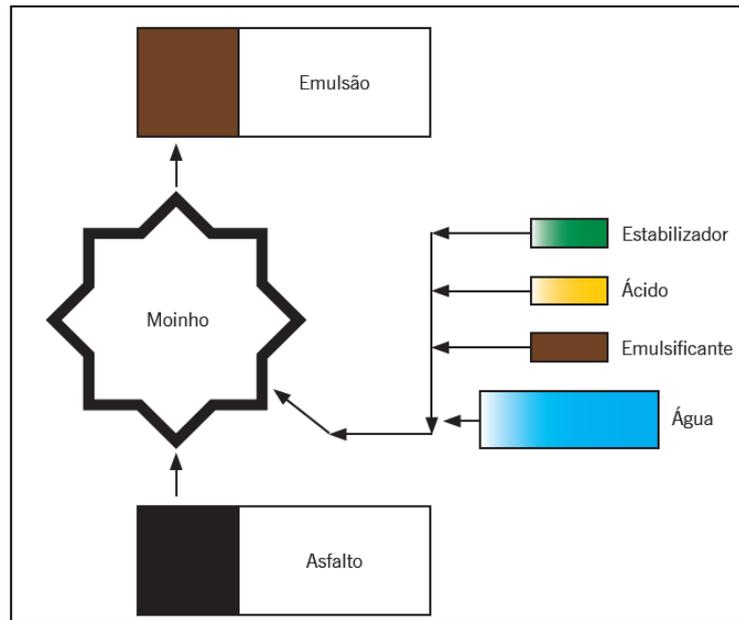
2.1.2. Misturas Asfálticas a Frio

As misturas a frio são aquelas que possuem em sua composição a Emulsão Asfáltica (EA) e asfalto diluído. Pelo fato da sua aplicação nas obras ser à temperatura ambiente, proporciona uma melhoria das condições de segurança, saúde e meio-ambiente. De acordo com ABEDA (2010), entre os inúmeros serviços que podem ser executados com emulsão asfáltica, o mais empregado é o PMF.

A especificação de material DNIT-ES 165/2013 define as emulsões asfálticas como um sistema constituído pela dispersão de uma fase asfáltica em uma fase aquosa, ou então de uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica, tendo a participação de um agente emulsificante que podem ser aniônicos ou catiônicos.

A emulsão asfáltica é constituída por CAP, água e agente emulsificante. No processo de emulsificação se faz necessário a quebra do CAP em micropartículas para que o mesmo fique disperso no meio aquoso. Logo os três componentes são colocados dentro de um moinho coloidal, cisalhando desta forma o asfalto em pequenos glóbulos. O agente emulsificante tem a função de evitar que estas partículas de asfalto voltem a se aglomerar, deixando assim em equilíbrio asfalto e água (ABEDA, 2010). A Figura 2 esquematiza o processo de produção da emulsão asfáltica.

Figura 2 - Esquema de produção da emulsão asfáltica catiônica



(Fonte: ABEDA, 2010)

A separação entre a fase aquosa e a fase asfáltica chama-se ruptura. As emulsões asfálticas são classificadas quanto a este tempo de separação entre as fases em Ruptura Lenta (RL), Ruptura Média (RM) e Ruptura Rápida (RR). Para complementar a classificação, adiciona-se 1C e 2C, onde C indica que a emulsão é catiônica, ou seja, a ruptura ocorre através da reação química de atração eletrostática entre emulsão e agregado. Nas emulsões aniônicas e não aniônicas a ruptura ocorre somente pela evaporação da água. Os números 1 e 2 referem-se a um menor e maior teor de asfalto na emulsão (ABEDA, 2010).

Para que uma mistura asfáltica contendo emulsão adquira resistência mecânica adequada é necessário um tempo de cura adicional. Durante a cura, um aumento nas propriedades mecânicas é realizado à medida que a água da mistura evapora e o ligante do asfalto recupera propriedades reológicas semelhantes às do asfalto base antes da emulsificação. A quantidade de tempo de cura necessária antes da obtenção de propriedades mecânicas aceitáveis é altamente variável e depende de muitos fatores, incluindo clima, composição da mistura e permeabilidade da mistura (DU, 2014).

2.1.2.1. Pré-misturado a frio

O PMF consiste numa mistura, em equipamento apropriado, de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (fíler) e emulsão asfáltica catiônica convencional ou modificada por polímeros (ruptura média ou lenta) espalhada e compactada a frio. A técnica é bastante utilizada na execução de camada intermediária de regularização e reforço da estrutura do pavimento, também conhecida como binder, em revestimentos asfálticos e serviços rotineiros de conservação do tipo tapa-buracos (ABEDA, 2010).

Desenvolvido na década de 50 nos Estados Unidos, o foco da utilização do PMF era as camadas de base e revestimento. No Brasil a sua produção se iniciou em escala industrial em 1966, sendo aplicado em camadas de base e regularização de pavimentos. O PMF de graduação mais densa só começou a ser utilizado em revestimentos na década de 80 (ABEDA, 2010).

Os PMFs são classificados em aberto, semidenso e denso, de acordo com a granulometria e a porcentagem de vazios. A Tabela 1 mostra a classificação dos PMF de acordo com as porcentagens passantes nas referidas peneiras e o volume de vazios.

Tabela 1 - Classificação dos tipos de PMF em função dos vazios

Denominação	P% Passando		Vazios
	Nº 10 (2mm)	Nº 200 (0,074mm)	
Aberto	$P \leq 10$	$P \leq 2$	22 a 34
Semidenso	$10 < P \leq 20$	$P \leq 5$	15 a 22
Denso	$P > 20$	$P \leq 8$	9 a 15

Fonte: ABEDA (2010)

ABEDA (2010) afirma que os PMFs densos e semidensos apresentam em sua composição emulsão de ruptura lenta RL-1C. Estes são os que apresentam melhor desempenho mecânico dentre os três tipos devido ao baixo índice de vazios, sendo assim o mais adequado para vias de médio volume de tráfego.

Já os PMFs densos ou abertos são boas alternativas para melhorar as condições de superfícies pavimentadas em paralelepípedos, lajotas e pedra irregular, corrigindo as depressões e irregularidades altimétricas existentes e reforçando a

capacidade de suporte da estrutura original. PMFs densos podem ser estocados por até sete dias.

PMFs com granulometria mais aberta possuem maior volume de vazios permitindo desta forma uma fuga relativamente rápida de voláteis, que resultaria em reduzida rigidez e resistência à deformação. Já um PMF denso pode fornecer melhor estabilidade e durabilidade após a aplicação, mas não teria boa trabalhabilidade para armazenamento e manuseio (LIAO et al., 2016).

Segundo Santana (1993) os PMFs possuem algumas particularidades que os diferem das misturas a quente, a começar pelo ligante, a emulsão asfáltica, que possui em sua composição água que lhe confere o estado fluido a temperatura ambiente. São algumas das vantagens do PMF, dentre elas: não agride o meio ambiente devido ao baixo gasto energético vez que não há consumo de combustíveis, sendo sua utilização à temperatura ambiente; alta trabalhabilidade devido ao estado fluido do ligante; e não há o endurecimento prematuro do asfalto por oxidação que geralmente é constatado nas usinas em misturas a quente.

No entanto, para o PMF atingir um desempenho ideal, se faz necessário longo período de cura e a resistência atingida é inferior ao CA. (SHANBARA; RUDDOCK; ATHERTON, 2018).

Embora o Concreto Asfáltico ofereça um desempenho melhor que o PMF, os CAs raramente são usados para manutenções em locais de difícil acesso, reparos de emergência ou manutenção de rotina devido a razões práticas e operacionais (FERROTTI; PASQUINI; CANESTRARI, 2014). Diaz (2016) reforça que a incapacidade de produzir e armazenar concreto asfáltico em pequenas quantidades a serem usadas conforme necessário os torna inadequados para buracos e outros reparos localizados.

Para atender a essa necessidade, o PMF é normalmente usado, pois suas características permitem que os usuários tenham disponibilidade imediata em estoque e utilizem quando e onde necessário (DIAZ, 2016). Entretanto, o uso do PMF até agora é limitado, utilizado principalmente para a construção de estradas rurais e estradas com baixa densidade de tráfego devido ao problema associado à sua estabilidade e durabilidade (JAIN; SINGH, 2021).

A especificação de serviço DNIT 153/2010 define a sistemática empregada na fabricação e aplicação de Pré-Misturado a Frio, com emulsão asfáltica catiônica convencional bem como os requisitos mecânicos e volumétricos para a aplicação da

mesma. Atualmente no Brasil, os PMFs são dosados de acordo com método do ensaio Marshall modificado (DNER-ME 107/94). As principais etapas desta dosagem em laboratório estão representadas na Figura 3 com: 1) período de cura após a mistura dos agregados com o ligante; 2) compactação manual do PMF; 3) corpos de prova em estufa a 60°C por um período de 24 horas.

Figura 3 - Etapas da dosagem de um PMF



Fonte: Jesus (2018)

Para a compactação dos corpos de provas, o compactador giratório e o martelo Marshall são os dispositivos mais usados. O uso do compactador giratório para o estudo de misturas asfálticas tem aumentado nos últimos anos porque permitiu uma melhor compreensão do processo de compactação, possibilitando o monitoramento da altura da amostra após cada rotação e fornecendo melhor simulação de compactação, visto que o efeito do amassamento produzido permite alcançar um menor volume de vazios na mistura sem ocorrer a quebra dos agregados (FLORES et al., 2020).

Liao et al. (2016) afirmam que a maioria dos ensaios de laboratório foram originalmente projetados para misturas asfálticas a quente, sendo então essencial desenvolver procedimentos de ensaios eficazes para avaliar as propriedades mecânicas de um PMF. Dessa forma, no presente estudo, o PMF será compactado através do compactador giratório SUPERPAVE, que até então é frequentemente utilizado para compactação de misturas mornas e misturas quentes.

2.1.2.2. Experiências com misturas frias compactadas por amassamento

Moreira, Nascimento e Soares (2005) realizaram a compactação de corpos de prova (CPs) de PMF, utilizando como ligante emulsão RL-1C, através do ensaio Marshall modificado e de uma adaptação da metodologia SUPERPAVE. Para esta última, seguiu-se os procedimentos iniciais da dosagem Marshall de acordo com a DNER-ME 107/94. Em seguida as amostras foram então compactadas no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) com 50 giros. O cilindro utilizado foi de 100 mm, possibilitando assim a comparação com os CPs da dosagem Marshall. Os resultados mostraram valores próximos da compactação por amassamento em relação à Marshall no ensaio de Resistência à Tração (RT) e uma superioridade da mesma na capacidade de resistência ao desgaste.

Chaves (2010) moldou CPs de areia asfalto (emulsão asfáltica catiônica e agregado miúdo), com emulsões RM-1C e RL-1C, através da compactação Marshall e pelo CGS. O método de cura utilizado foi da norma DNER107/94, porém, foi necessário aumentar o tempo de 1 para 3 horas nas misturas com RL-1C, para facilitar a retirada dos CPs do molde sem danificar os mesmos. Os resultados com RM-1C mostraram que os valores de RT foram muito baixos por não ter sido realizada a cura em estufa. As misturas com RL-1C apresentaram valores de RT maiores, porém, inferiores em relação aos CPs Marshall curados em estufa. Também, observou-se que a compactação giratória apresentou CPs com densidade aparente maior e menor Volume de Vazios (VV). Com relação ao Módulo de Resiliência (MR) CPs com compactação giratória tiveram valores maiores (com filer) e menores (sem filer) em relação a compactação Marshall.

Thanaya et al. (2009) em seu estudo objetivou avaliar e melhorar (com adição de cimento e vidro) as propriedades das misturas a frio, dentre elas: parâmetros volumétricos, módulo de rigidez à tração indireta, fluência axial de carga repetida e fadiga. Todas essas propriedades foram comparadas com misturas de asfalto quente convencionais. Para isso foram moldadas três composições da mistura fria no CGS. Com 240 KPa de pressão axial e ângulo de rotação de 2°, os autores definiram dois níveis de compactação deste equipamento: médio (80 rotações que equivale a 50 golpes Marshall) e pesado (120 rotações que equivale a 75 golpes Marshall). Em seguida os CPs foram submetidos à cura controlada a 40°C até massa constante

sendo que cura total foi alcançada entre 18 a 21 dias à temperatura ambiente. Os resultados indicaram que em condições de cura total, a rigidez das misturas a frio foi considerada muito semelhante à das misturas a quente e que o comportamento à fadiga das misturas a frio que incorporaram cimento foi comparável ao das misturas a quente.

2.2. Mistura Asfáltica Ensacada

A Mistura Asfáltica Ensacada busca conciliar eficiência e praticidade em operações preventivas ou emergenciais do tipo tapa-buracos. Zhang, Wang e Lu (2019) afirmam que este tipo de mistura é comumente usado na prática de manutenção de buracos da pavimentação, objetivando a reabilitação do pavimento de maneira oportuna e eficiente, bem como a melhora do nível de serviço e da vida útil da rodovia.

Atualmente no Brasil existem algumas empresas produtoras da mistura asfáltica ensacada. Pode-se citar: REPAV asfaltos, PAVBahia, Ultra Asfaltos e JorcalPav, Usina do Vale, Usicity, TBI Asfalto Frio, Asfalto Pronto Brasil, EasyPav, Ultra CBUQ, PAV Fácil entre outras.

Segundo informações divulgadas por estas empresas em suas páginas na internet, a MAE é um tipo de mistura que é usinada a quente, porém sua aplicação é realizada a temperatura ambiente.

A Betunel produz a MAE AsfaltoFácil®. Trata-se de um concreto asfáltico dosado com CAP modificado por um aditivo químico que permite a estocagem da mistura asfáltica produzida e posterior aplicação à temperatura ambiente (ANTT, 2017).

O aditivo utilizado pela Betunel é o KA-146U® concentrado, Figura 4, que dependendo da quantidade colocada na mistura, permite a estocagem do concreto asfáltico com diferentes prazos, variando em poucos dias até seis meses. A empresa relata também que o concreto asfáltico é produzido em temperaturas ao redor de 120°C.

Figura 4 - Aditivo KA-146U® produzido pela empresa Betunel



Fonte: ANTT (2017)

Já o Centro de Pesquisa & Desenvolvimento GRECA Asfaltos desenvolveu o Aditivo TB, que quando misturado em proporções pré-definidas ao CAP 50/70 quebra a tensão superficial das partículas promovendo o aumento da capacidade lubrificante do ligante envolvendo mais facilmente os agregados e o manuseio e aplicação a frio (GRECA, 2013).

2.2.1. Vantagens

As informações a respeito deste produto ainda são escassas. Geralmente o que se conhece sobre este material provém dos próprios fabricantes, os quais, apresentam diversas vantagens na sua utilização, tais como:

- Pronto para uso com possibilidade de estocagem de 30 dias (a granel) até 20 meses;
- Apresenta resistência à água, logo pode ser aplicado em dias de chuva;
- Imediata liberação do trânsito após aplicação;
- Fácil aplicação não necessitando assim de mão de obra especializada e equipamentos de grande porte;

2.2.2. Desvantagens

A aceitação da MAE vem se tornando cada vez mais restrita por causa da sua ineficiência nos reparos. Zhang, Wang e Lu (2019) atribui isto dois fatores: Em primeiro lugar, a mistura asfáltica de remendo a frio à base de solvente se comporta de forma insatisfatória no desempenho do pavimento, como baixa resistência inicial, velocidade de moldagem lenta e vida útil curta, o que dificulta sua consolidação no mercado. Em

segundo lugar está a ausência de padrões ou requisitos industriais razoáveis para este tipo de material asfáltico.

2.2.3. Usinagem, execução e armazenamento

GRECA (2013) divide em quatro etapas a modificação do CA convencional com o Aditivo TB:

1. Modificação do CAP 50/70 com aditivo TB

O CAP 50/70 estando numa faixa de temperatura entre 140 e 150°C recebe o Aditivo TB numa proporção de 15% em peso, ou seja, 2000 kg de CAP 50/70 modificado por Aditivo TB é constituído por 1700 kg de ligante e 300 kg de Aditivo TB. Em seguida realiza-se a homogeneização da mistura CAP e Aditivo TB através de agitadores mecânicos.

2. Usinagem com CAP 50/70 modificado com Aditivo TB

As temperaturas de usinagem indicadas para a produção de mistura ou massa asfáltica com CAP 50/70 modificado com Aditivo TB são: Ligante Asfáltico (pré-usinagem): 125 – 130° C; Agregados (momento da mistura): 130 – 135°C; Mistura Asfáltica (pós-usinagem): 125 - 135°C. A temperatura da mistura deve ser checada a cada traço após a usinagem, inclusive em cima do caminhão durante a descarga da usina. Para tal, deve-se utilizar termômetros analógicos que são mais adequados.

3. Armazenagem da mistura asfáltica

A massa ou mistura asfáltica deve ser armazenada em pilhas de, no máximo, 25 ton, num local protegido do sol e de preferência fechado, como um galpão por exemplo. O processo de ensacamento deve ocorrer pelo menos 24 horas após a produção da massa asfáltica, quando esta já estiver fria. Os sacos devem ser de 20 kg e podem ser empilhados num número máximo de 5 sacos. Caso a opção seja não ensacar, o monte de massa asfáltica deve ser coberto com uma lona, mesmo estando em ambiente fechado, pois o contato com o ar acelera o processo de reação entre o Aditivo TB e o oxigênio, diminuindo a capacidade de trabalhabilidade da massa asfáltica. Processo executivo de aplicação.

4. Processo executivo de aplicação

Para a aplicação da mistura asfáltica se aconselha-se inicialmente realizar a limpeza do local em que a mistura será aplicada. Após a retirada do material solto, aplica-se uma pintura de ligação, com emulsão asfáltica RR-1C diluída em água numa

proporção de 50%. Caso isso não seja possível, é importante que o aplicador esteja ciente de que poderão ocorrer desprendimentos devido à falta de ligação entre a mistura asfáltica e a superfície do buraco. A aplicação da mistura asfáltica é realizada a temperatura ambiente, a mesma (armazenada em sacos ou não) deve ser despejada até preenchimento total do buraco. Em seguida, realiza-se a compactação através de placas vibratórias, compactadores de percussão ou rolos de diversos tamanhos conforme a área a ser compactada. A Figura 5 ilustra o processo explicitado acima.

Figura 5 - Processo executivo de aplicação da MAE



2.2.4. Estudos Internacionais com a Mistura Asfáltica Ensacada

A MAE vem sendo comercializada internacionalmente como Mistura Asfáltica de Remendo a Frio a base de solvente. A empresa escocesa Red Stag Materials produz este tipo de mistura e a denomina como *EZ Street*, apresentado na Figura 6. A informação veiculada pela empresa é de que a mistura vem como uma alternativa

econômica aos meios tradicionais de reparo de buracos, sendo significativamente mais rápida de instalar do que outras opções. Além de não requerer maquinário pesado para a instalação, a mistura pode ser comprada a granel e armazenada por até 12 meses. (“Scottish company introduces US pothole repair product”, 2020)

Figura 6 - Mistura Asfáltica Ensacada EZ Street produzida pela Red Stag Materials



Este tipo de mistura possui em sua composição solventes que geralmente incluem hidrocarbonetos orgânicos como diesel e querosene (WANG *et al.*, 2020). Estes possuem uma grande solubilidade no betume e uma volatilidade apropriada. No entanto, muito do solvente permanece com o material por um longo tempo, conferindo-o flexibilidade e resultando em um ganho relativamente lento de rigidez com baixa resistência inicial (MUNYAGI, 2006).

Munyagi (2006) avaliou o desempenho de misturas asfálticas ensacadas patenteadas disponíveis na África do Sul. Em sua pesquisa, marcas de cinco diferentes fornecedores foram usadas: *Roadfix* (A), *Tarfix* (B), *Much- Asphalt mix* (C), *Asphalt King* (D) e *Glenpatch* (E). Foram investigadas as propriedades volumétricas, permeabilidade e resistência à tração indireta. Verificou-se que todos os cinco produtos possuíam elevado percentual de vazios, os quais variam entre 15,1% e

23,5% tornando esse tipo de mistura fria altamente permeável. Os valores de RT encontrados foram considerados muito baixos em comparação com o valor mínimo de 800 kPa (0,8 MPa) especificado para misturas a quente na África do Sul. Além disso, os produtos com emulsão presente no ligante (*Asphalt King* e *Glenpatch*) foram considerados mais suscetíveis a danos causados pela água em comparação com outras misturas com asfalto reduzido (CAP + solvente).

Santiago, Roldán e Priddy (2010) conduziram ensaios de laboratório e de campo em vários produtos de MAE comercial para determinar sua adequação para reparos de pavimento de aeródromo. A pesquisa incluiu um conjunto de testes de laboratório que foram comparados com os resultados de ensaios de campo em escala real. Para tanto, os CPs foram moldados no compactador giratório modelo AFGC125X da *Pine Instruments Company*. Foram avaliadas as propriedades volumétricas e mecânicas, as quais, resistência, durabilidade, trabalhabilidade, fluência estática e fluência dinâmica. A avaliação de campo consistiu em quatro reparos, que foram trafegados 24 horas após a compactação, sob condições de tráfego controlado, para determinar a capacidade dos reparos de suportar a carga bruta de uma aeronave F-15E. Os resultados mostraram baixo desempenho das misturas asfálticas, chegando-se à conclusão de que não são adequados para reparos de asfalto em pavimentos de aeródromos, especialmente em áreas de tráfego pesado ou, principalmente, em áreas trafegadas por aeronaves de alta pressão de pneus, como o F-15E.

Algumas pesquisas desenvolvidas a respeito deste tipo de mistura normalmente objetivam a melhora do seu desempenho por meio de incremento ou substituição do solvente adicionado no ligante.

Para Zhang, Wang e Lu (2019) a mistura é composta de agregados minerais e ligante modificado chamado asfalto de remendo a frio. Na pesquisa, os autores utilizaram diferentes composições de resina epóxi no ligante com o objetivo de eliminar as deficiências deste tipo de mistura. Os resultados mostram que este aditivo pode melhorar significativamente a resistência, a suscetibilidade à umidade, o desempenho em altas temperaturas e a coesão. No entanto, a adição inadequada pode levar a uma baixa capacidade de armazenamento e desempenho em baixa temperatura.

Wang et al. (2020) investigou o desempenho deste tipo de mistura com graduação aberta usando dois novos solventes no ligante asfáltico: álcool mineral e acetato de isoamila, com fins de uso de remendos em pavimentos porosos. Os

resultados mostraram que as misturas a frio de álcool mineral e acetato de isoamila apresentaram maior resistência inicial e de cura, valores de coesividade, desempenho anti-cracking e resistência à deformação permanente do que a mistura asfáltica de remendo a frio convencional, cujo solvente era diesel. Além disso, as misturas contendo álcool mineral e acetato de isoamila apresentaram menor suscetibilidade à umidade do que a mistura contendo diesel.

2.2.5. Histórico de pesquisas nacionais com a MAE

Como já citado, a MAE apresenta-se como um tipo de mistura economicamente viável para a aplicação em pequena escala, e por este motivo, vem sendo bastante utilizada em operações emergenciais, porém, sem uma norma técnica específica. Assim, estudos na linha proposta dessa pesquisa tornam-se interessantes para a obtenção de banco de dados que caracterizem a MAE.

O Quadro 1 apresenta o histórico em cronologia anual de algumas pesquisas nacionais relacionados à utilização e estudo da MAE.

Quadro 1 – Histórico de pesquisas nacionais com a Mistura Asfáltica Ensacada

Ano	Histórico
2017	Santana e Lourenço (2017) avaliaram a qualidade da MAE a partir de três amostras de diferentes estados brasileiros. Estas foram moldadas de acordo com a metodologia Marshall, com exceção da Amostra 03A que foi moldada seguindo a metodologia SUPERPAVE. Posteriormente, foram realizados os seguintes ensaios mecânicos: Estabilidade e Fluência Marshall, Resistência à Tração (RT), Desgaste Cântabro e Módulo de Resiliência (MR). Os resultados mostraram que as misturas possuem características e propriedades distintas e inferiores às apresentadas pelos fabricantes, além valores inferiores aos limites mínimos exigidos pelo DNIT.
2017	Oliveira (2017) caracterizou uma MAE no Estado de Goiás estabelecendo três grupos de estudo: Corpos de prova moldados a 60°C, moldados a frio com tempo de cura de 7 dias e moldados a frio sem tempo de cura. Todos os corpos de prova foram moldados e caracterizados de acordo com a DNER-ME 043/95. Os resultados dos ensaios mecânicos mostraram que o

	<p>grupo moldado à 60°C apresentou os melhores resultados, enquanto o grupo sem tempo de cura os resultados mais desfavoráveis. Entretanto, nenhum dos grupos avaliados atendeu plenamente as exigências da norma DNIT 031/2006, referente ao concreto asfáltico convencional.</p>
2017	<p>ANTT (2017) produziu uma mistura de CA, com CAP 50/70 e adição do aditivo KA-146U da Betunel, dando origem a uma Mistura Asfáltica Ensacada que foi mantida ensacada em sacos plásticos por 3 períodos de tempo (3, 15 e 30 dias). A moldagem dos corpos de prova foi feita no Compactador Giratório Superpave (CGS) para a realização dos ensaios mecânicos de MR e RT depois de 7 e 15 dias de cura. Os resultados de MR ficaram entre 625 e 1236MPa e os de RT entre 0,12 e 0,14 MPa, valores estes compatíveis com mistura do tipo pré-misturado a frio. Os tempos de cura e estocagem não tiveram influência perante às propriedades mecânicas contrariando o esperado.</p>
2018	<p>Carvalho et al., (2018) moldaram corpos de prova de uma MAE de acordo com a DNER–ME 043/95 com algumas modificações e os separaram em dois grupos, os compactados a frio e os que foram aquecidos à temperatura de 60 °C, sendo que os corpos de prova compactados a frio foram ensaiados sob a condição sem cura e com cura de 7 dias, já os corpos de prova compactados com aquecimento foram ensaiados sem cura. Os resultados apontaram que os corpos de prova compactados a 60°C apresentaram resultados melhores comparados aos que foram compactados sem aquecimento. Além disso, as amostras preparadas com cura de 7 dias a céu aberto apresentaram certa melhora quando comparadas com amostras sem cura. Porém, nenhum corpo de prova atendeu aos parâmetros de volumetria e de desempenho mecânico exigidos na norma DNIT 031/2006.</p>
2018	<p>Jesus (2018) comparou uma Mistura Asfáltica Ensacada proveniente da cidade de Simões Filho – BA com um PMF dosado em laboratório. Os corpos de prova da MAE foram caracterizados de acordo com a DNER – ME 107/94 para diferentes energias de compactação (50 e 75 golpes). Os</p>

	<p>resultados mostraram que para ambas as energias, os valores de estabilidade atenderam as exigências da norma DNIT 153/2010 , porém os valores de fluência ultrapassaram os limites exigidos. PMF e MAE tiveram parâmetros mecânicos e volumétricos aproximados, comprovando que a MAE apresenta melhor comportamento quando ensaiada a frio.</p>
2019	<p>Rezende <i>et al.</i> (2019) realizaram a moldagem a 60°C de 12 corpos de prova, de uma MAE produzida na região metropolitana de Goiânia, no CGS. Após a moldagem, os CPs foram separados em duas condições: seis com cura e seis sem cura. A cura foi realizada ao ar livre por 30 dias, sem aplicação de carregamento. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios mecânicos de RT e MR. Os resultados dos ensaios de RT não enquadraram no valor mínimo de 0,65 MPa estipulado pela norma DNIT 031/2006, independentemente da condição de cura. Os valores obtidos para o ensaio de MR se encontraram dentro da faixa de 2000 a 8000 MPa de acordo Bernucci <i>et al.</i> (2008), porém a razão MR/RT teve valores muito elevados, acima do valor máximo de 5000 indicado por Bernucci <i>et al.</i> (2008).</p>
2019	<p>Oliveira e Santana (2019) compararam uma Mistura Asfáltica Ensacada com um CA convencional através da metodologia Marshall. Os corpos de prova da MAE foram compactados variando a temperatura (com e sem pré-aquecimento a 150°C) e grau de compactação (75 e 150 golpes). Os CPs então foram submetidos à ensaios de estabilidade, fluência e RT. Os resultados demonstram que os corpos de prova com 150 golpes resistiram mais, porém, tiveram maiores deformações. Os corpos de prova compactados a frio tiveram baixa resistência independente do grau de compactação. Já os CPs pré-aquecidos obtiveram os melhores resultados, e apesar dos valores de estabilidade terem sido menor que do CA convencional, atenderam as exigências da norma DNIT 031/2006.</p>
2020	<p>De Carvalho et al. (2020) estudaram o Concreto Asfáltico Estocável (CAE) provenientes de três fabricantes diferentes da região de Goiânia-GO: CAE-A, CAE-B e CAE-C. Além da extração do ligante, os CPs do CAE foram</p>

	compactados via amassamento à 60°C. Os ensaios mecânicos foram realizados considerando-se amostras sem cura e com cura (a céu aberto) de 60 dias. Os resultados mostraram que o CAE não tem o comportamento de um CA convencional. Além da compactação por amassamento não ser suficiente para densificar a mistura, os resultados mecânicos mostraram-se inconclusivos, pois não se constatou aumento da rigidez ao longo do tempo de cura.
2021	Araujo et al. (2021) realizou a caracterização de uma Mistura Asfáltica Ensacada comercial, MAE comercializada no Estado da Bahia. As amostras foram caracterizadas como misturas betuminosas a quente (DNER–ME 043/95) e a frio (DNER–ME 107/94) e foram comparadas com duas misturas de controle: uma quente (CA) e uma fria (PMF), que foram dosadas em laboratório em teor de projeto. A mistura comercial, ensaiada como mistura a frio, também foi analisada quanto ao seu comportamento ao longo do tempo. Os resultados demonstraram que a mistura asfáltica ensacada analisada não se enquadrou nos requisitos de um CA convencional. Todavia, o material apresentou comportamento similar quando comparado a um PMF. Constatou-se também perda de resistência da MAE ao longo do tempo.

2.2.6. Comentários Finais

Como os fabricantes divulgam a MAE como um CA que pode ser estocado, a mesma deveria apresentar resistência no mínimo semelhante. Porém, com base nos estudos apresentados no Quadro 1, percebe-se que tal fato não vem acontecendo e a MAE tem apresentado comportamento mecânico inferior a um CA. Além disso, os estudos demonstram também que o seu esqueleto pétreo vem apresentando divergências, com algumas amostras dentro da Faixa C especificada pela norma DNIT 031/2006 e outras totalmente fora desta faixa.

Portanto, em função das observações realizadas ao longo da revisão bibliográfica, torna-se imprescindível o aprofundamento do estudo da MAE, a fim de aumentar o arcabouço teórico sobre a mesma e ajudar os órgãos regulamentadores a estabelecer normas que preconizem a produção e execução dessa mistura.

2.3. Serviços de conservação e manutenção de pavimentos asfálticos

Segundo DNIT (2007), a conservação de um pavimento pode ser: corretiva, reparando ou sanando um defeito já existente na rodovia; periódica, que acontece em um período pré-determinado; preventiva periódica, acontece com determinada frequência a fim de evitar o surgimento ou agravamento dos defeitos; rotineira, manutenção regular da via e de seus dispositivos; e a conservação de emergência, que consiste em um conjunto de operações destinadas a corrigir os defeitos que aparecem repentinamente na pista ocasionando interrupção do tráfego e oferecendo riscos aos condutores.

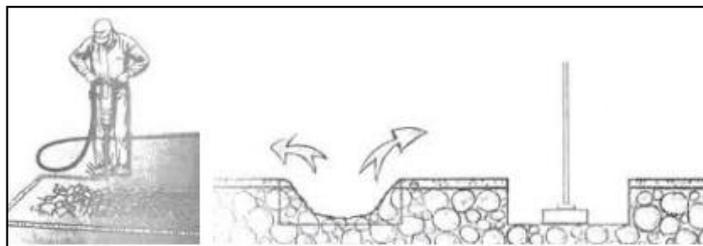
2.3.1. Remendos

Esse serviço, popularmente conhecido como operação “tapa-buraco”, é realizado normalmente por prefeituras, que consiste na aplicação de uma mistura asfáltica nos buracos do pavimento deteriorado, com a finalidade de evitar acidentes e a interdição da rodovia caso fosse executado um recapeamento total.

Siano *et al.* (2016), descreve o manual de procedimentos sobre conservação de vias urbanas da Prefeitura de São Paulo. Para proceder o serviço “tapa-buraco” se faz necessário:

- a) Demarcar o do perímetro da área a ser trabalhada e cortar o revestimento existente formando uma vala em torno da área degradada com todas as bordas verticais como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Demarcação e vala para recebimento da mistura asfáltica

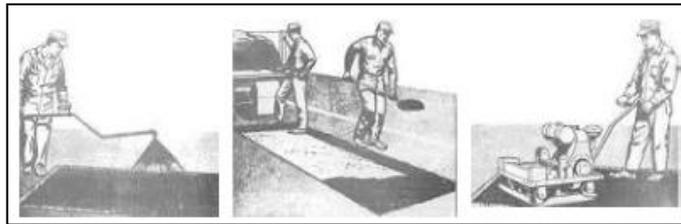


Fonte: Prefeitura de São Paulo (2016)

- b) Realizar a limpeza do local com vassouras, jatos de ar e ar comprimido (caso haja água no buraco)

- c) Aplicar a pintura de ligação com ligante betuminoso RR-1C ou RR-2C a fim de promover a aderência entre as camadas
- d) Após o rompimento da emulsão, mudança de cor marrom para preta, aplicar a massa asfáltica (CA). Essa aplicação deve ser feita utilizando-se pás e começando o lançamento no sentido dos bordos para o centro.
- e) A espessura da camada compactada deve situar-se entre 3,0cm a 8,0cm, exigindo-se que para camadas mais espessas, o lançamento de massa asfáltica se faça por etapas de 3,0cm a 8,0cm.
- f) Após verificar que nas periferias do buraco não existe excedente inicia-se a compactação partindo-se da periferia da caixa progredindo para o centro do remendo. A Figura 8 apresenta a sequência supracitada.

Figura 8 - sequência executiva da operação "tapa-buraco"



Fonte: Prefeitura de São Paulo (2016)

De acordo com Bernucci *et al.* (2008) o remendo de asfalto, apesar de ser uma atividade de conservação, é considerado um defeito no pavimento, pois, aponta um local de fragilidade do revestimento e podendo dessa forma provocar danos ao conforto e ao rolamento.

Como o remendo representa uma região de instabilidade mecânica no pavimento, pode também não possuir longa durabilidade, sendo necessário apenas em casos emergenciais, quando a interrupção do tráfego na via para recapeamento total do trecho não é possível, a fim de evitar acidentes ou agravar a situação do buraco no pavimento.

2.3.2. Selagem de trincas

De acordo com DNIT (2006) a selagem de trinca, representada na Figura 9, consiste no enchimento manual com ligante asfáltico das trincas e fissuras do pavimento flexível, impedindo dessa forma, a percolação da água para as camadas subjacentes do pavimento.

Segundo Rocha (2009) esse método vem sendo bastante utilizado no Brasil por ser prático, eficaz e de baixo custo. O selamento é indicado em pavimentos bem estruturados com trincas em seu estado inicial, já que esta solução não apresenta função estrutural. O método, além de poder ser utilizado como preliminar a um recapeamento, selando as trincas para que não reflitam no novo revestimento, também pode ser empregado como manutenção rotineira do pavimento, liberando o tráfego logo após sua aplicação.

Figura 9 - Selagem de trincas em pavimento asfáltico



2.3.3. Recuperações superficiais (Recargas)

Segundo DNIT (2006), as recuperações superficiais são um conjunto de serviços que visam as correções dos defeitos externos. As operações destinam-se a impermeabilizar as fissuras de revestimentos, retardar a perda dos agregados, atenuar as sequelas prejudiciais decorrente da oxidação do ligante, recuperar a rugosidade do pavimento desgastado pela ação abrasiva do tráfego ou pela inadequação dos agregados utilizados, e corrigir pequenas irregularidades geométricas, como por exemplo, a trilha de roda.

Para o DNIT (2006), as principais operações para esse tipo de manutenção consistem em:

- a) Recapeamento do pavimento atual com misturas asfálticas usinadas (PMF, areia asfalto a frio ou a quente ou CA). A espessura do recapeamento é da ordem de 2,5 cm.
- b) Aplicação de lama asfáltica (LA): segundo ABEDA (2010) a lama asfáltica consiste em uma mistura fluida de agregados minerais, fíler, emulsão asfáltica catiônica e água. A LA, Figura 10, é bastante utilizada na manutenção preventiva dos pavimentos que se encontram em bom estado, porém, desgastados por causa do tráfego e intempéries, funcionando assim como uma capa impermeabilizante, sempre inferior a 1,0 cm.

Figura 10 - Aplicação da lama asfáltica

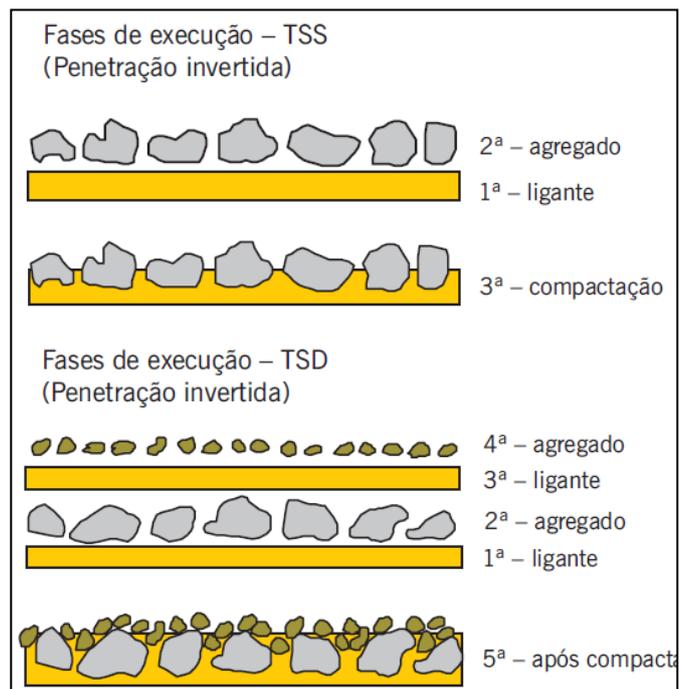


Fonte: ABEDA (2010)

- c) Tratamentos superficiais (TS): De acordo com ABEDA (2010), os TS são utilizados principalmente para: melhorar a aderência pneu-pavimento; proteger a infraestrutura do pavimento dos desgastes do tráfego e do clima e recuperar o revestimento existente com o seu poder de impermeabilização e redução de propagação de trincas. Executado a frio, este tipo de revestimento possui de 0,5 a 2,5 cm de espessura (ABEDA, 2010). Como mostra a Figura 11, inicialmente é realizada uma varredura na base para a eliminação das

partículas de pó. No TS simples (TSS), aplica-se a emulsão asfáltica e imediatamente o agregado para se ter uma boa aderência. Por último, ocorre a aplicação do rolo pneumático para a acomodação da mistura. Se tratando de um Tratamento Superficial Duplo ou Triplo (TSD ou TST), a execução ocorre de maneira similar ao TSS simples (BERNUCCI et al., 2008).

Figura 11 - estrutura do TSS e TSD



Fonte: Bernucci et al. (2008)

- d) Aplicação de capa selante: consiste em um TSS (com agregados de 9 a 13mm), que confere flexibilidade e características de reabilitação nos pavimentos com trincas inativas, seguido por uma selagem com microrrevestimento asfáltico a frio – MRAF para dar a rugosidade ideal da via. ABEDA (2010) reforça que este tipo de serviço é utilizado na reabilitação de rodovias com tráfego médio ou pesado.

CAPÍTULO 3

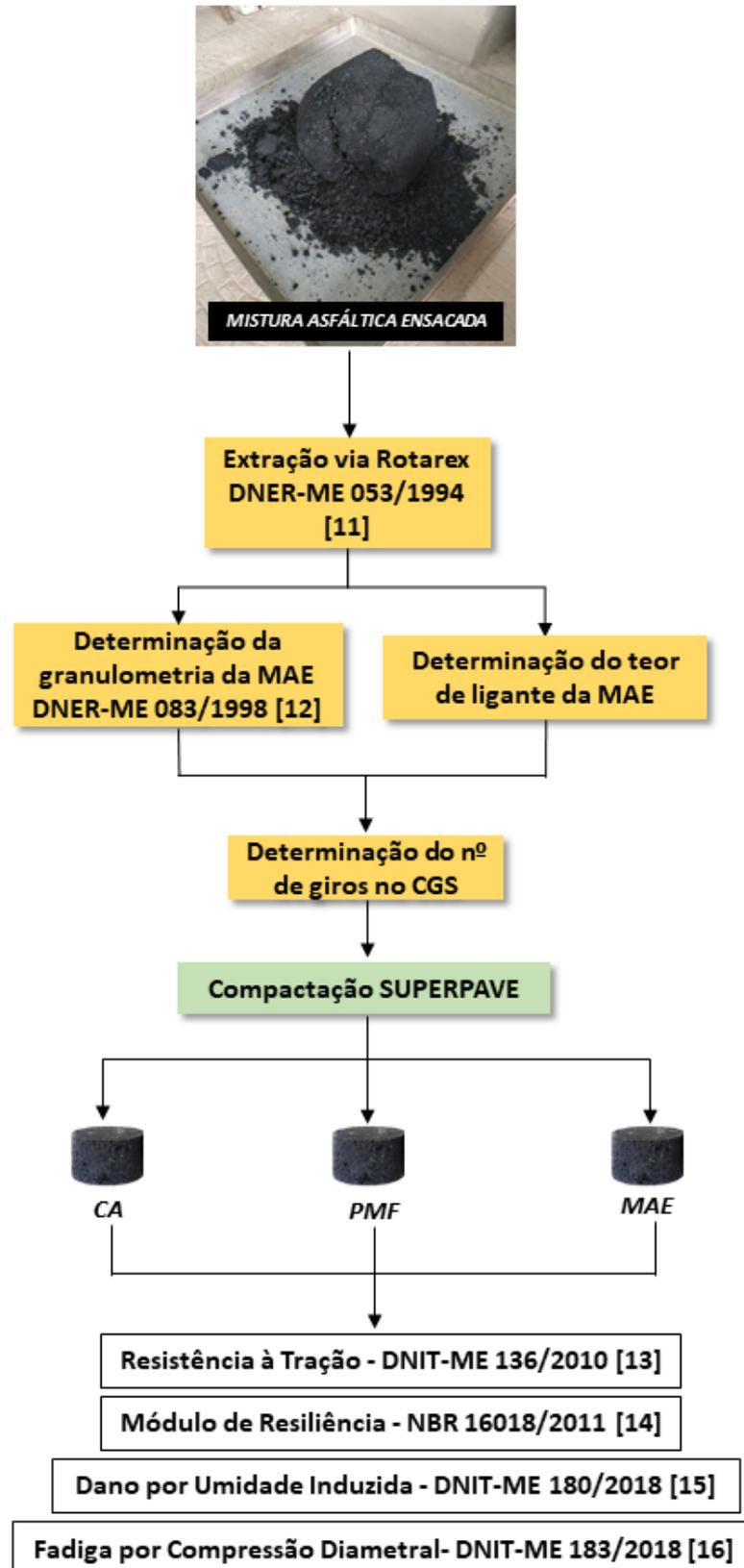
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados todos os procedimentos bem como os materiais utilizados durante a fase experimental da pesquisa. A Figura 12 apresenta de maneira geral a sequência lógica da pesquisa. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande.

A primeira etapa trata-se da extração do ligante da MAE para serem obtidos: curva granulométrica e percentual de ligante asfáltico. De posse desses dois resultados, foi possível então realizar a dosagem das misturas de controle: PMF e do CA. De fato, estas misturas devem obedecer o mesmo esqueleto pétreo e percentual de ligante da MAE para a comparação entre elas possa ser fidedigna, embora os agregados das misturas de controle tenham procedência distinta dos agregados da MAE.

Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da ASTM (*American Society for Testing Materials*) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Figura 12 – Fluxograma da metodologia da pesquisa



3.1. Materiais utilizados

3.1.1. Ligante asfáltico

Os ligantes asfálticos utilizados para a fabricação das misturas de controle do estudo foram a emulsão asfáltica RL-1C, fornecida pela empresa Brasquímica Produtos Asfálticos Ltda localizada em Candeias-BA, e o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70) cedido pela usina da empresa Rocha Cavalcante localizada no município de Campina Grande-PB.

3.1.2. Agregados

A estrutura pétreo do PMF e do CA foi constituída através de agregados minerais de origem granítica, Figura 13. Dentre os agregados graúdos foram selecionadas as britas 19 mm e 12,7 mm. Como agregado miúdo foi utilizado o pó de pedra. Todos estes materiais foram fornecidos pela pedreira Brita Forte localizada na PB 032 – Sítio Bela Rosa – Pedra do Fogo-PB. O material de enchimento (fíler) utilizado foi a cal hidratada, adquirida no mercado local.

Figura 13 – Agregados graníticos utilizados na fabricação das misturas de controle



3.1.3. Mistura Asfáltica Ensacada

Para a pesquisa foram adquiridos dois sacos de 25 kg cada da MAE, diretamente da empresa fabricante, localizada em Recife. Como mostra a Figura 14,

os sacos foram devidamente condicionados em um balde fechado e livre de incidência solar, pois o contato com o ar acelera o processo de reação entre o aditivo retardador de cura e o oxigênio, diminuindo a capacidade de trabalhabilidade da massa asfáltica (GRECA, 2013).

Figura 14 - Armazenamento da MAE



3.2. Métodos

3.2.1. Caracterização da mistura asfáltica ensacada

3.2.1.1. Determinação do teor de ligante e granulometria

Para se obter amostras representativas para o ensaio de extração de betume, a MAE foi destorroada e quarteada até se chegar à massa de 1200g como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Destorroamento e quarteamento da MAE



Em seguida, foi realizada via Rotarex a extração do ligante da MAE, de acordo com os procedimentos descritos na DNER-ME 053/94. O solvente utilizado foi a gasolina comum. Após a extração, os agregados da MAE foram colocados para a secagem em estufa por 24 horas para a evaporação total do solvente e realização do ensaio de granulometria. A sequência da extração está representada na Figura 16.

Figura 16 - Extração de ligante asfáltico da MAE



Tendo como base a informação de que a MAE é comercializada como um CA estocável, a série de peneiras utilizada para o ensaio de granulometria foi de acordo com a faixa C especificada pela norma DNIT-ES 031/2006 para a primeira verificação desta mistura. Os resultados mostrados na Tabela 2 e nas Figuras 18 e 19, indicam que a MAE está enquadrada dentro da Faixa C para CA, muito próxima à curva superior, que é resultado de um material mais denso com maior quantidade de agregados miúdos e finos. A Figura 17 mostra os agregados da MAE pós-extração.

Figura 17 - Agregados da MAE após extração



Tabela 2 - Granulometria dos agregados da MAE

Peneiras		% Passante			
pol	mm	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	100,00	98,71	98,89	99,20
3/8"	9,5	90,50	87,89	87,30	88,56
04	4,8	68,42	65,83	67,25	67,17
10	2	46,74	45,19	47,11	46,35
40	0,42	24,75	24,32	25,02	24,70
80	0,18	14,65	14,39	14,78	14,61
200	0,075	7,71	7,62	7,68	7,67

Figura 18 - Composição granulométrica da MAE e das misturas de controle na curva Fuller

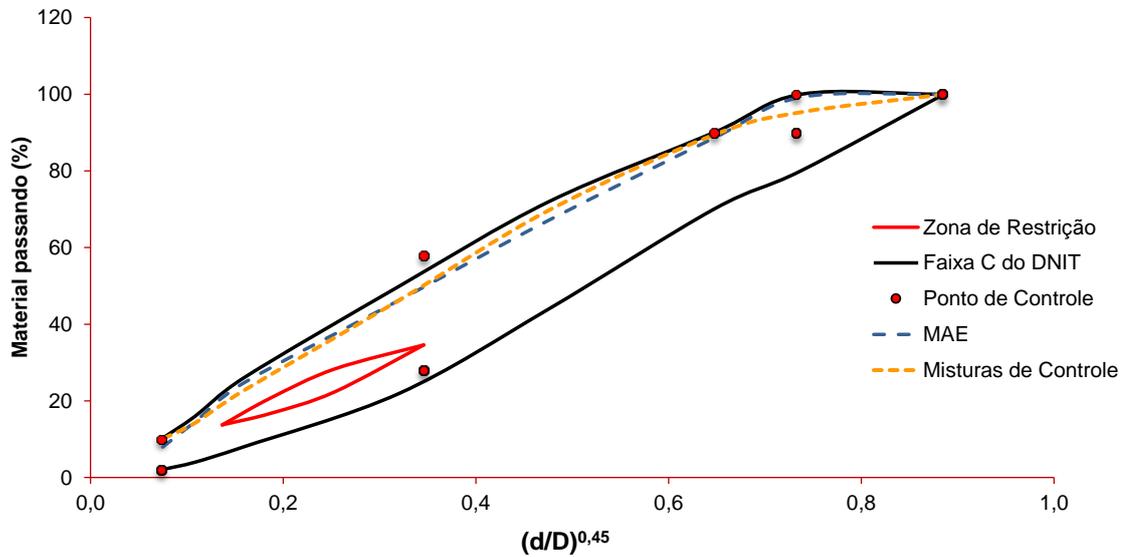
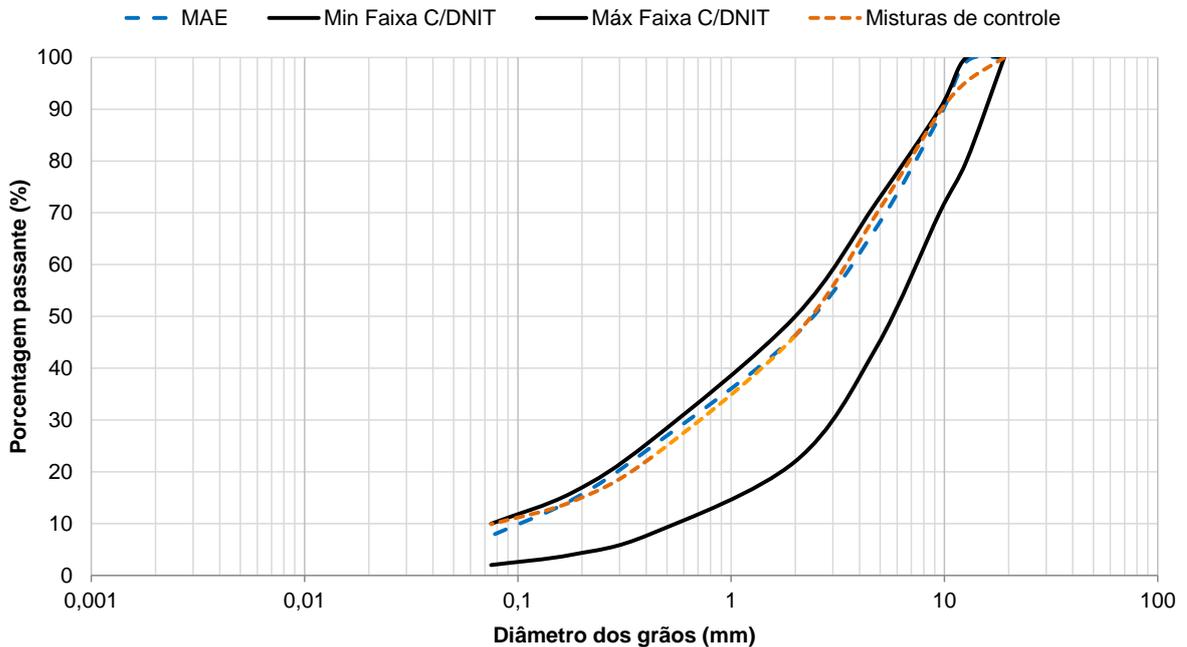


Figura 19 - Composição Granulométrica da MAE e das misturas de controle



A MAE e as misturas de controle possuem curvas suaves, apresentando dessa forma concavidade usual de materiais bem graduados. Misturas com distribuições de partículas bem graduadas compactam melhor porque as partículas mais finas preenchem os vazios entre as partículas maiores. Em misturas mal graduadas, a distribuição das partículas é mais uniforme, o que significa que todas as partículas

agregadas têm aproximadamente o mesmo tamanho. Nestes casos, existe uma quantidade menor de partículas mais finas para preencher os vazios entre as partículas maiores, fazendo com que os níveis de compactação sejam menores.

Munyagi (2006) afirma que para uma boa trabalhabilidade da mistura, uma graduação mais aberta é desejada. A trabalhabilidade é necessária durante as operações de manuseio no estoque e durante a execução, especialmente em climas frios, além de estar livre de grumos que sejam difíceis de quebrar, fato que não é observado na Figura 15 com a MAE do presente estudo. A autora reforça que a mistura com pouca trabalhabilidade geralmente produz remendos ruins no pavimento. Após a mistura ser colocada em um buraco, é preferível uma graduação mais densa para melhorar a durabilidade do material.

Quanto ao percentual de ligante asfáltico, a norma DNIT-ES 031/2006 define a faixa de teor de ligante para CA entre 4,5 a 9% para camada de rolamento. Os resultados apresentados na Tabela 3 mostram que o teor de ligante médio da MAE está dentro da faixa especificada pelo DNIT.

Tabela 3 - Determinação do teor de ligante asfáltico da MAE via Rotarex

Determinação	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Peso da mistura	501,90	534,90	610,90
Peso da mistura seca	475,02	508,40	580,10
Ligante asfáltico (g)	26,88	26,50	30,80
Teor de ligante asfáltico (%)	5,36	4,95	5,04
Teor de ligante médio (%)		5,12	

3.2.1.2. Determinação do número de giros padrão para as misturas

A moldagem dos corpos de prova SUPERPAVE da MAE foi realizada no CGS do Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, que é mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Compactador Giratório SUPERPAVE



Inicialmente, foram moldados 3 corpos de prova (CPs) teste para a determinação do número de giros a ser adotado nas compactações dos CPs desta mistura.

O parâmetro de moldagem inicial fixado no CGS foi adotado de acordo com ANTT (2017) de 100 giros, aumentando-se posteriormente este valor a cada 50 giros. A pressão aplicada foi de 600 KPa com ângulo de giro de $1,25^\circ$. Como a mistura é aplicada a temperatura ambiente, o processo de envelhecimento em 2 horas na estufa antes da compactação não foi adotado.

Após a moldagem foram determinados os parâmetros volumétricos que estão indicados nas Figuras 22 e 23 para cada energia de compactação. O método de ensaio DNER 117 (DNER, 1994) determina a utilização de fita adesiva e parafina para a determinação da densidade aparente de misturas com percentual de vazios acima de 10%, porém uma vez que era esperado do CA obter, neste estudo, percentual de vazios abaixo de 7%, optou-se pela não utilização da fita adesiva e parafina, adotando-se então apenas a pesagem ao ar e submersa, Figura 21, para os três tipos de mistura da pesquisa.

Figura 21 - Pesagem submersa de corpo de prova



Figura 22 - Percentual de vazios x nº de giros

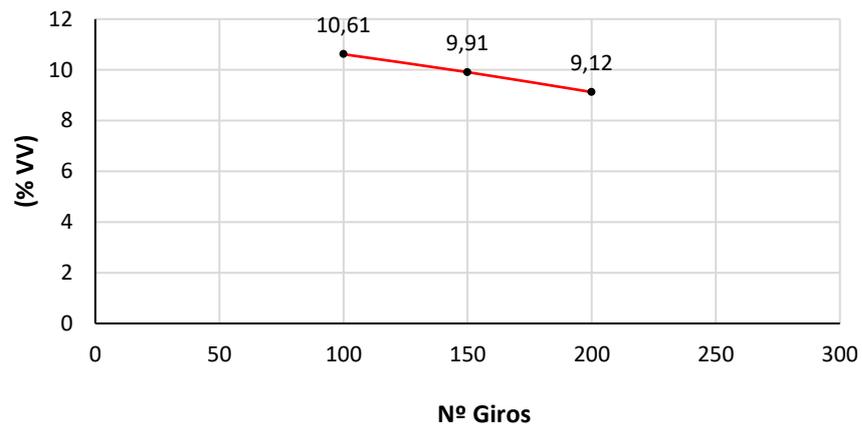
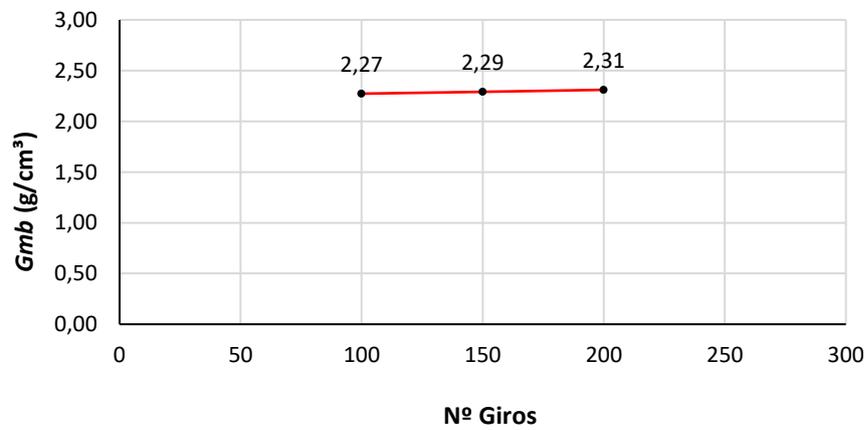


Figura 23 - Massa específica aparente x nº de giros

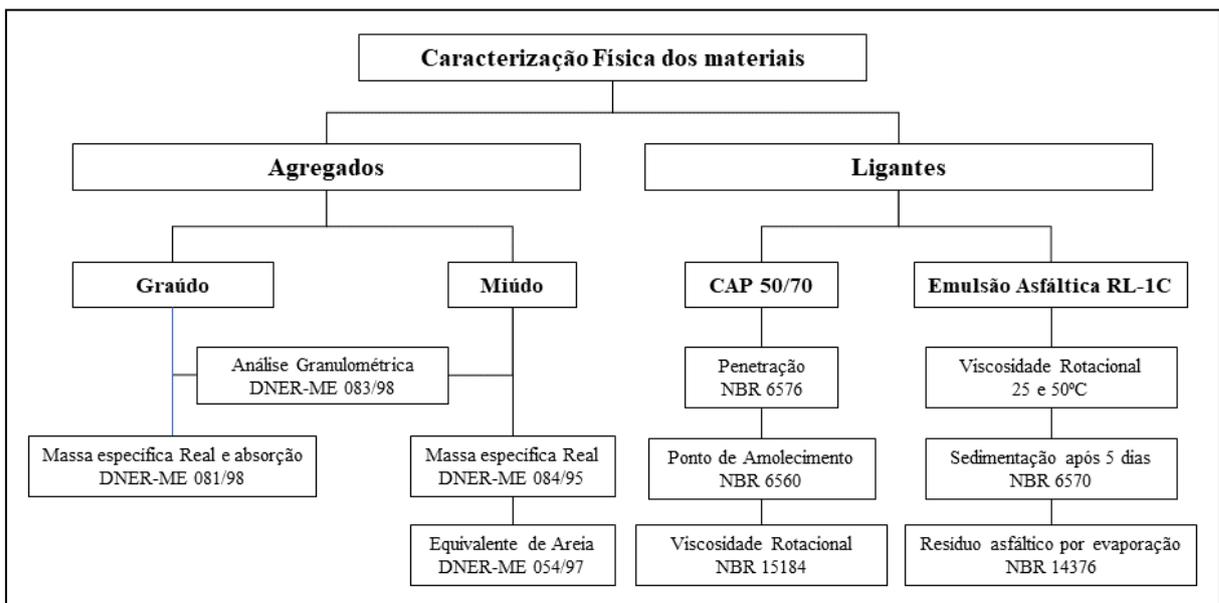


Com base nos resultados apresentados nas figuras acima, foram adotados 100 giros para a compactação dos corpos de prova da MAE, já que os valores do percentual de vazios e da massa específica aparente não sofreu variação significativa com a mudança do número de giros. Essa foi a energia padrão para a compactação das misturas asfálticas de controle, CA e PMF.

3.2.2. Propriedades físicas dos materiais

A Figura 24 apresenta a sequência dos experimentos realizados com os agregados e ligantes das misturas de controle.

Figura 24 - Fluxograma da caracterização física dos materiais



3.2.2.1. Propriedades físicas da emulsão RL-1C e do CAP 50/70

A Tabela 4 apresenta os ensaios e suas respectivas normas para a emulsão RL-1C. Estes ensaios foram realizados e fornecidos pela própria empresa fornecedora do produto, Brasquímica Produtos Asfálticos Ltda.

Tabela 4 - Caracterização da emulsão asfáltica RL-1C realizada pela empresa fornecedora

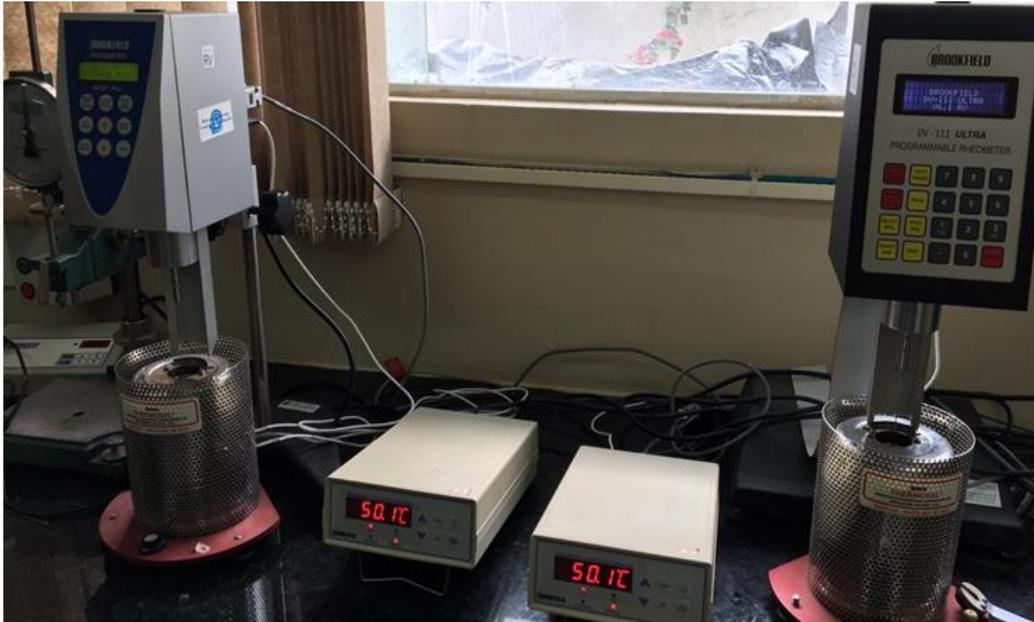
Característica	Resultado	Limites	Norma
Viscosidade Saybolt-Furol a 25°C (SSF)	21	≤ 90	NBR-14491

Sedimentação após 5 dias, (% massa)	2,6	≤ 5	NBR-6570
Peneiração, 0,84 mm, (% massa)	0,01	≤ 0,1	NBR-14393
Carga de partícula	positiva	positiva	NBR-6567
PH	2,6	≤ 6,5	NBR-6299
Densidade a 25°C	1,0	-	-
Resíduo asfáltico (% min em massa)	60,5	≥ 60	NBR-14376

Observa-se da Tabela 4 que todos os ensaios com a emulsão asfáltica RL-1C, realizados pela empresa fornecedora do produto, obedecem aos pré-requisitos exigidos pelas suas respectivas normas. Entretanto, para fins comprobatórios, alguns ensaios foram novamente realizados. Os resultados apresentam-se na Tabela 3. Embora até o momento o ensaio de viscosidade rotacional com a emulsão asfáltica não seja preconizado por nenhuma norma, realizou-se o procedimento no viscosímetro Brookfield, Figura 25, com os seguintes parâmetros: Temperaturas de 25 e 50°C para 25 e 50 rotações por minuto respectivamente.

É desejável uma menor viscosidade do ligante para melhor capacidade de armazenamento e trabalhabilidade de misturas frias, mas após a execução, uma viscosidade mais alta é preferível o mais rápido possível para melhor coesão da mistura (MUNYAGI, 2006).

Figura 25 - Viscosímetro Brookfield e resultado do ensaio de viscosidade gerado pelo software do equipamento



Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs				
File: E:\RESULTADOS - VISCOSÍMETRO ROTACIONAL\2021\FELIPE BAHIA\RL1C 89.DB									
Test Date: 16/6/2021					Test Time: 12:45:27		Model: RV		Spindle: SC4-21
Sample Name:									
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)	
1	54,00	25,00	2,7	12,56	23,25	25,0	25,1	00:07:01,3	
2	29,00	50,00	2,9	13,48	46,50	50,1	50,1	00:10:57,3	

Tabela 5 - Ensaio com a emulsão asfáltica RL-1C realizados pelo autor

Característica	Resultado	Limites	Norma
Viscosidade Rotacional 25°C (cp)	54	-	-
Viscosidade Rotacional 50°C (cp)	29	-	-
Sedimentação após 5 dias, (% massa)	0,33	≤ 5	NBR-6570
Resíduo asfáltico (% min em massa)	61,02	≥ 60	NBR-14376

Com os resultados apresentados na Tabela 5, ratifica-se que a emulsão respeita as exigências mínimas preconizadas pelas normas. O teor de 61,02% de resíduo foi o adotado para o cálculo do percentual de ligante do PMF. Com a sedimentação após 5 dias de 0,33% a emulsão mostrou-se estável, ou seja, os seus constituintes (água + emulsificante + CAP) não se separam com facilidade.

Tabela 6 - Caracterização do CAP 50/70

Característica	Resultado	Limites	Norma
Penetração (0,1mm)	52,8	50-70	NBR-6576
Ponto de Amolecimento (°C)	55,5	≥ 46	NBR-6560
Viscosidade Rotacional 135°C (cp)	490,0	≥ 274	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 150°C (cp)	262,0	≥ 112	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 177°C (cp)	98,0	57-285	NBR-15184
Densidade	1,0	-	-

Como o CAP utilizado nessa pesquisa foi proveniente de estudos anteriores, infere-se da Tabela 6 que apesar de obedecer às exigências das normas que preconizam os ensaios realizados, percebe-se um certo grau de envelhecimento no ligante, com uma penetração mais próxima do limite inferior e aumento do ponto de amolecimento, além da elevada viscosidade rotacional.

3.2.2.2. Propriedades físicas dos agregados das misturas de controle

A Tabela 7 apresenta todos os ensaios realizados para a caracterização de todos os agregados.

Tabela 7 - Ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Especificação
Análise granulométrica por peneiramento	DNER-ME 083/98
Massa específica real e absorção do agregado graúdo	DNER-ME 081/98
Massa específica real do agregado miúdo	DNER-ME 084/95
Equivalente de areia	DNER-ME 054/97

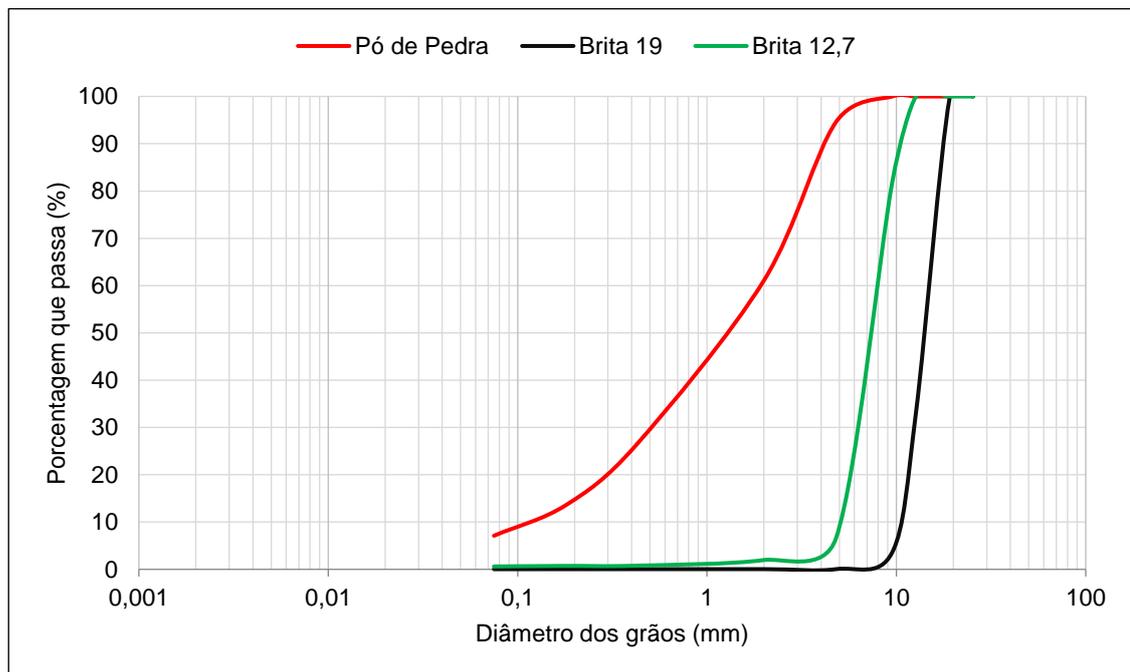
- **Granulometria**

A Tabela 8 indica a quantidade de material passante em cada peneira, referente ao ensaio de granulometria de cada brita utilizada na pesquisa e a Figura 26 contempla as suas respectivas curvas.

Tabela 8 - Granulometria dos agregados

PENEIRA		% PASSANTE			Faixa C - DNIT	
pol	mm	Brita 19	Brita 12,7	Pó de Pedra	Min	Max
1"	25,4	100	100	100	-	-
3/4"	19,1	99,60	100	100	100	100
1/2"	12,7	33,23	100	100	80	100
3/8"	9,5	3,57	81,76	100,00	70	90
04	4,8	0,04	6,56	94,60	44	72
10	2	0,04	1,97	61,09	22	50
40	0,42	0,04	0,77	26,16	8	26
80	0,18	0,03	0,73	13,58	4	16
200	0,075	0,03	0,61	7,10	2	10

Figura 26 – Distribuição Granulométrica dos agregados



Percebe-se da Figura 26 que dentre os agregados utilizados, as britas 19 e 12,5 possuem declividades semelhantes aproximando-se da vertical, denotando a uniformidade destes dois materiais, ou seja, a maioria dos grãos dessas duas britas possuem a mesma dimensão.

Já o pó de pedra apresenta uma curva com menor declividade, sendo, portanto, um material melhor graduado que as britas 19 e 12,5.

- **Massa específica e absorção**

Na Tabela 9 consta os valores do ensaio de massa específica real e aparente e absorção dos agregados utilizados no presente estudo.

Tabela 9 - Massa específica e absorção dos agregados

Agregado	Massa Específica Real (g/cm³)	Massa Específica Aparente (g/cm³)	Absorção (%)
Brita 19	2,67	2,64	0,46
Brita 12,7	2,67	2,62	0,71
Pó de Pedra	2,51	2,48	0,60

- **Equivalente de Areia**

O ensaio de equivalente de areia foi realizado com os agregados miúdos da pesquisa. Os valores expostos na Tabela 10 mostram que o pó de pedra obedece aos limites estabelecidos pela DNER 031/2006.

Tabela 10 - Equivalente de areia dos agregados miúdos

Ensaio	Limite	Pó de Pedra
Equivalente de Areia	≥ 55%	65,04

3.2.3. Produção das misturas asfálticas de controle

Jain e Singh (2021) relatam que uma das formas de preparação dos CPs de PMF é através do Compactador Giratório SUPERPAVE, que gira a amostra em um ângulo horizontal. Este ângulo varia de 1° a 6°C. Isso produz uma ação de amassamento na amostra, que simula melhor a compactação em campo em laboratório do que o martelo de impacto Marshall.

Com a finalidade de comparar o CA e o PMF com a MAE, não se fez necessária a determinação do teor de projeto da dosagem SUPERPAVE das misturas de

controle. A premissa dessa metodologia, segundo Bernucci *et al.* (2008), consiste em escolher, dentre três composições granulométricas, inferior, intermediária e superior, a mistura que contendo 5% de ligante forneça um volume de vazios mais próximo de 4%, para em seguida, estimar-se o teor de ligante inicial para a composição escolhida.

Porém, no presente estudo, para fins comparativos entre as três misturas asfálticas, foram adotados tanto para o CA quanto para o PMF, a mesma composição granulométrica, representada pela curva das misturas de controle na Figura 18 e 19, mesma energia de compactação e o mesmo teor de asfalto presente na MAE, de 5,12%.

O processo de mistura e cura das amostras de PMF foram realizados seguindo-se o método de ensaio DNER 107 (DNER, 1994), Figura 27, sendo substituído o compactador Marshall pelo CGS na moldagem dos CPs.

Figura 27 - Dosagem do PMF



A mistura com os agregados foi realizada de forma manual. Como a emulsão utilizada foi a RL-1C, o tempo de cura adotado foi de 1 hora. A massa de mistura preparada para cada corpo de prova foi de 1200g com um teor de resíduo asfáltico presente na emulsão de 5,12%. Após a moldagem no CGS, os CPs foram submetidos à cura por 24 horas em estufa à 60°C.

A água adicionada na mistura tem o objetivo de lubrificação dos agregados (THANAYA; ZOOROB; FORTH, 2009). Este fato melhora a trabalhabilidade e também o revestimento dos agregados ao receberem a emulsão (JAIN; SINGH, 2021). A ausência de água para o umedecimento prévio dos agregados nas primeiras amostras acarretou em uma mistura não homogênea, Figura 28. Portanto, foi adicionada à mistura 3% de água.

Figura 28 - Mistura de PMF sem água e com água



3.2.4. Ensaios mecânicos

As caracterizações mecânicas possibilitaram a comparação do desempenho mecânico da MAE frente o PMF e o CA, além da análise mecânica das misturas frias quando compactadas por amassamento. Após a compactação, os CPs de PMF e da MAE e da mistura de referência foram submetidos ao processo de cura a temperatura ambiente durante um período de 7 dias. A realização dos ensaios mecânicos se deu apenas após a obediência deste intervalo, visto que processo de cura é função da dissipação e evaporação da água e aditivo no caso do PMF e da MAE respectivamente.

Os ensaios foram realizados após um período de 7 dias seguintes à compactação dos CPs a fim de uniformizar o tempo de cura, principalmente no que se diz respeito à MAE e o PMF. Os ensaios realizados estão expostos no fluxograma da Figura 29 e na Tabela 11, em conjunto as respectivas normas dos mesmos.

Figura 29 - Fluxograma de caracterização mecânica das misturas asfálticas

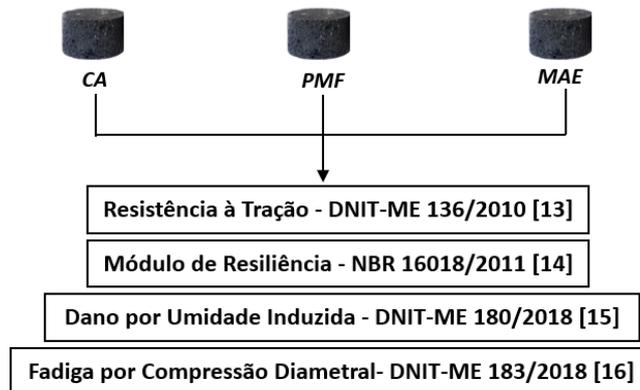


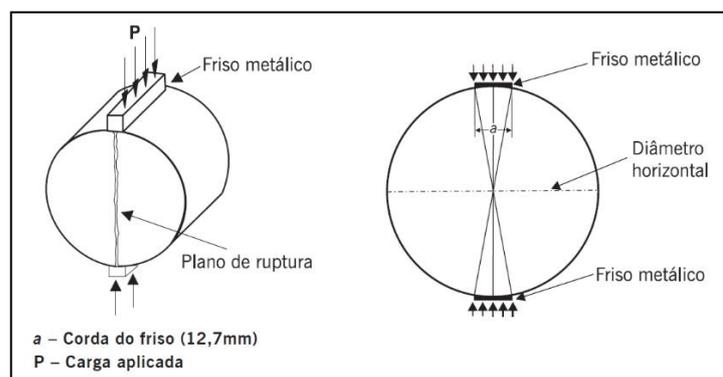
Tabela 11 - Ensaio de caracterização mecânica

Ensaio	Metodologia
Resistência à Tração	DNIT-ME 136/2010
Módulo de Resiliência	NBR 16018/2011 e DNIT 135/2018
Dano por Umidade Induzida (DUI)	DNIT-ME 180/2018
Fadiga por Compressão Diametral	DNIT-ME 183/2018

3.2.4.1. Resistência a Tração

Bernucci *et al.* (2008) relata que a configuração do ensaio de Resistência a Tração considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro.

Figura 30 - Esquema do ensaio de Resistência a Tração



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

De acordo com método de ensaio DNIT 136 (DNIT, 2010), depois de moldados, são medidas as alturas e diâmetros dos corpos de prova e em seguida os mesmos são colocados em estufa a 25°C. Após esse período, o corpo de prova é colocado com sua superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos, conforme ilustra a Figura 30, e aplica-se a carga progressivamente, com uma velocidade de deformação média de 0,8 mm/s até a ruptura do corpo de prova.

A Resistência a Tração é obtida através da Equação 1:

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (1)$$

Onde:

σ_R : resistência à tração, em MPa;

F: carga de ruptura, em N;

D: diâmetro de corpo-de-prova, em cm;

H: altura do corpo-de-prova, em cm.

3.2.4.2. Módulo de Resiliência

De acordo com o método de ensaio DNIT 135 (DNIT, 2018) o Módulo de Resiliência de uma mistura é a relação entre a tensão horizontal resultante da carga cíclica e a correspondente deformação horizontal resultante do deslocamento horizontal recuperável (resiliente), por ciclo. O ensaio foi realizado na prensa hidráulica UTM-25 como mostra a Figura 31.

Figura 31 - corpo de prova na UTM-25 durante ensaio de Módulo de Resiliência



O ensaio consiste na aplicação de pulso de cargas com frequência de 1Hz, de duração 0,1 s e repouso de 0,9 s, no plano diametral vertical do corpo de prova. Essa carga gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga, e os LVDTs (Linear Variable Differential Transformers) medem o deslocamento diametral recuperável na direção correspondente à tensão gerada (deslocamento horizontal). A carga utilizada para o ensaio de Módulo de Resiliência no presente estudo foi correspondente a 10% da Resistência à Tração. O resultado final foi a média de 3 CPs, expresso em MPa.

Costa (2017) cita que os fatores que influenciam no resultado de módulo de resiliência de uma mistura asfáltica são o tipo de mistura; faixa granulométrica (quanto mais grossa for a faixa adotada maior será o módulo de resiliência); tipo de ligante (quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade maior será o módulo de resiliência); temperatura de ensaio (quanto maior for a temperatura menor será o módulo de resiliência e quanto menor for a temperatura maior será o módulo de resiliência); temperatura de compactação (quanto menor for a temperatura de compactação menor será o módulo de resiliência); Energia de compactação (quanto maior for a energia de compactação maior será o módulo de resiliência); propriedades volumétricas, entre outras variáveis.

3.2.4.3. Dano por Umidade Induzida

O ensaio simula a perda de resistência ou outros danos causados pela umidade no pavimento, consistindo em submetê-los à ação da água e a ciclos degelo. De acordo com o método de ensaio DNIT 180 (DNIT, 2018) que preconiza esse ensaio, avalia-se a adesividade agregado-ligante e a coesão da mistura em condições resultantes de saturação e de condicionamento acelerado em presença de água.

Inicialmente aplica-se vácuo nos CPs, de 250 a 260 mmHg durante 5 a 10 minutos, em recipiente adequado e logo após permanecem por mais 5 a 10 minutos em repouso na água. Em seguida os CPs são colocados em sacos plásticos, a ele adicionados 10 ml de água, e o conjunto é exposto por 16 horas a -18°C. Após esse período os CPs ainda dentro dos sacos são colocados em banho maria a 60°C por 24 horas, e terminada essa etapa, são soltos em um outro banho a 25°C. Estabilizada a última temperatura, o ensaio de RT é realizado nos CPs sem condicionamento e com condicionamento, obtendo dessa forma a RRT (Resistência a Tração Retida) que está representada pela equação 2

$$RRT = \frac{RTc}{RT} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

RTc: RT média dos CPs com condicionamento

RT: RT média dos CPs sem condicionamento

RRT: Resistência a Tração Retida

O método de ensaio DNIT 180 determina que os corpos de prova para a realização do ensaio tenham 7% de percentual de vazios. No entanto, esse percentual não pôde ser obtido com a MAE. Logo, optou-se por realizar o DUI com os CPs das misturas, no percentual de vazios em que se encontravam.

3.2.4.4. Fadiga por compressão diametral

O método de ensaio DNIT 183 (DNIT, 2018) define a vida de fadiga de um revestimento asfáltico como sendo o volume de tráfego expresso pelo número equivalente do eixo padrão (N) que o revestimento pode suportar antes que o dano observado, em termos de quantidade de trincas, atinja uma determinada porcentagem

de área trincada admissível para cada tipo de via. De acordo com Bernucci *et al.* (2008), a fadiga no pavimento ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que não parecem críticas por si, se comparadas à resistência sob carregamento monotônico, mas na verdade são decisivas para a vida útil do material.

De acordo com Ofori-Abebresse (2006) o trincamento por fadiga em um pavimento pode iniciar de duas formas: (a) trincamento de baixo para cima, causado pelas altas tensões de tração na parte inferior da camada de revestimento, que podem ser ocasionadas pela insuficiente rigidez das camadas de base ou revestimento; (b) trincamento de cima para baixo, onde as trincas se iniciam na superfície da camada de revestimento e propagam-se pelas camadas inferiores do pavimento. Isso pode ser causado pela ação do tráfego, o qual induz tensões cisalhantes acima do nível do projeto.

Neste estudo, o ensaio foi realizado na câmara da prensa UTM-25, por compressão diametral à tensão controlada, numa frequência de pulso de 1 Hz, sendo 0,1s para a aplicação da carga senoidal e 0,9s de repouso. O corpo de prova foi posicionado no suporte, seguindo o mesmo esquema da Figura 28. A temperatura de ensaio foi de 25°C e foram adotados os níveis de tensão no intervalo de 25 a 40% da resistência à tração de cada tipo de mistura.

A vida de fadiga foi expressa em termos de diferença de tensões ($\Delta\sigma$) e a deformação específica resiliente. Essas variáveis foram calculadas por meio das equações 3 e 4.

$$\Delta\sigma = \frac{8F}{100\pi dh} \quad (3)$$

$$\varepsilon_i = \frac{(\%)RT}{MR} \quad (4)$$

Onde:

$\Delta\sigma$: diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa);

F: carga aplicada (N);

d: diâmetro do corpo de prova (cm);

h: altura do corpo de prova (cm);

ε_i : deformação resiliente específica;

RT: resistência à tração (MPa);

MR: módulo de resiliência (MPa);

As equações 5 e 6 expressam o número de ciclos (N) que indicam a vida de fadiga do material em termos de diferença de tensões ou deformação resiliente específica respectivamente.

$$\varepsilon_i = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_1} \quad (5)$$

$$\varepsilon_i = k_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_2} \quad (6)$$

Onde:

N: número de ciclos de carregamento necessários para ruptura completa do CP;

$\Delta\sigma$: diferença entre as tensões horizontais e verticais no centro do corpo de prova;

ε_i : deformação de tração inicial;

k, n : parâmetros experimentais.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Propriedades volumétricas das misturas asfálticas

A Tabela 12 representa os parâmetros volumétricos de cada mistura da pesquisa. São valores médios de 3 CPs compactados com o número de giros padrão definido no item 3.2.2.2.

Tabela 12 - Propriedades volumétricas das misturas asfálticas compactadas com 100 giros no CGS

Parâmetro	MAE	PMF	CA
Gmm (g/cm³)	2,54	2,39	2,45
Gmb (g/cm³)	2,28	2,22	2,34
VV (%)	10,35	7,44	4,47
VAM (%)	22,02	18,77	16,45
RBV (%)	53,01	60,37	72,84

Nota: Gmm = massa específica máxima medida; Gmb = massa específica aparente; VV = volume de vazios; VAM = Vazios no Agregado Mineral; RBV = Relação Betume-Vazios

De acordo com as informações divulgadas na Tabela 1 por ABEDA (2010), o percentual de vazios para PMFs densos está entre 9 e 15%. Segundo Liao *et al.* (2016), um PMF com gradação densa pode fornecer melhor estabilidade e durabilidade após a execução, mas não teria boa trabalhabilidade para armazenamento e manuseio.

Embora a MAE tenha granulometria típica de mistura densa, o material apresentou o maior percentual de vazios dentre as misturas. Tal motivo pode ser explicado pelo fato do material ser compactado a frio bem como a presença de umidade na mistura. Santiago, Roldán e Priddy (2010) atribuem em seu estudo a umidade excessiva antes e depois da compactação como principal fator para o maior volume de vazios. Porém esse comportamento não se reflete na massa específica aparente, que deveria ser a menor dentre as misturas. A explicação para isso pode ser o fato dos agregados da MAE poderem ter sido mais pesados, gerando assim maior massa específica.

Elevados VV e VAM (tudo o que não é agregado, ou seja, vazios com ar e vazios com asfalto efetivo) são resultados de uma mistura com muitas descontinuidades em sua matriz pétreia, gerando dessa forma uma mistura asfáltica com baixa resistência.

4.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Figura 32 apresenta os resultados médios de três CPs por mistura, do ensaio de Resistência à Tração para cada tipo de mistura asfáltica, enquanto que a Figura 33 mostra os resultados do presente estudo em comparação às misturas asfálticas ensacadas de pesquisas internacionais e nacionais, citados no item 2.2.4 e 2.2.5 respectivamente. Da Figura 32 o destaque vai para a mistura quente, que apresentou valor 90% maior que o do PMF, atendendo ao limite mínimo preconizado pela especificação de serviço DNIT 31 (DNIT, 2006), de no mínimo 0,65 MPa (a 25°C). A MAE apresentou valor médio de RT cerca de 44% do valor do PMF.

Figura 32 - Resistência à Tração das misturas asfálticas

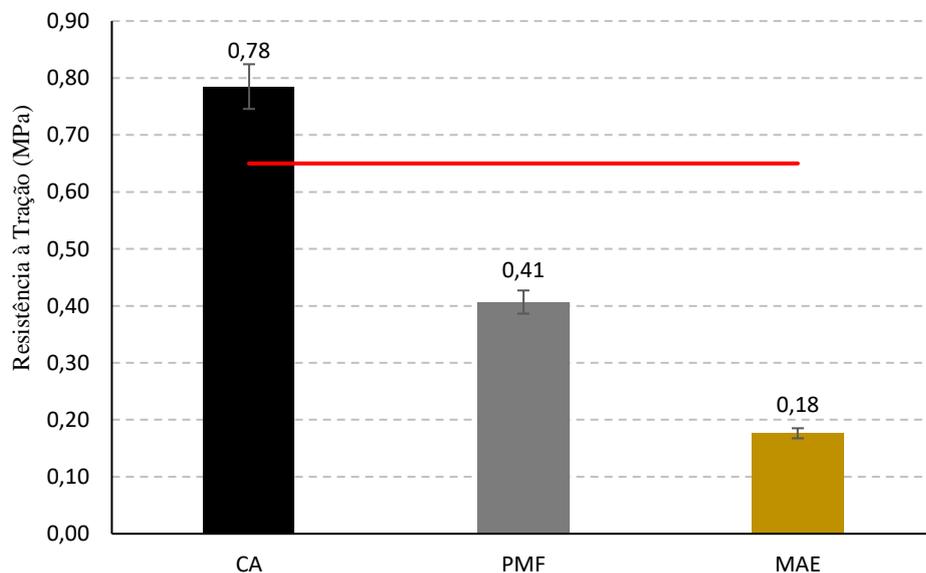
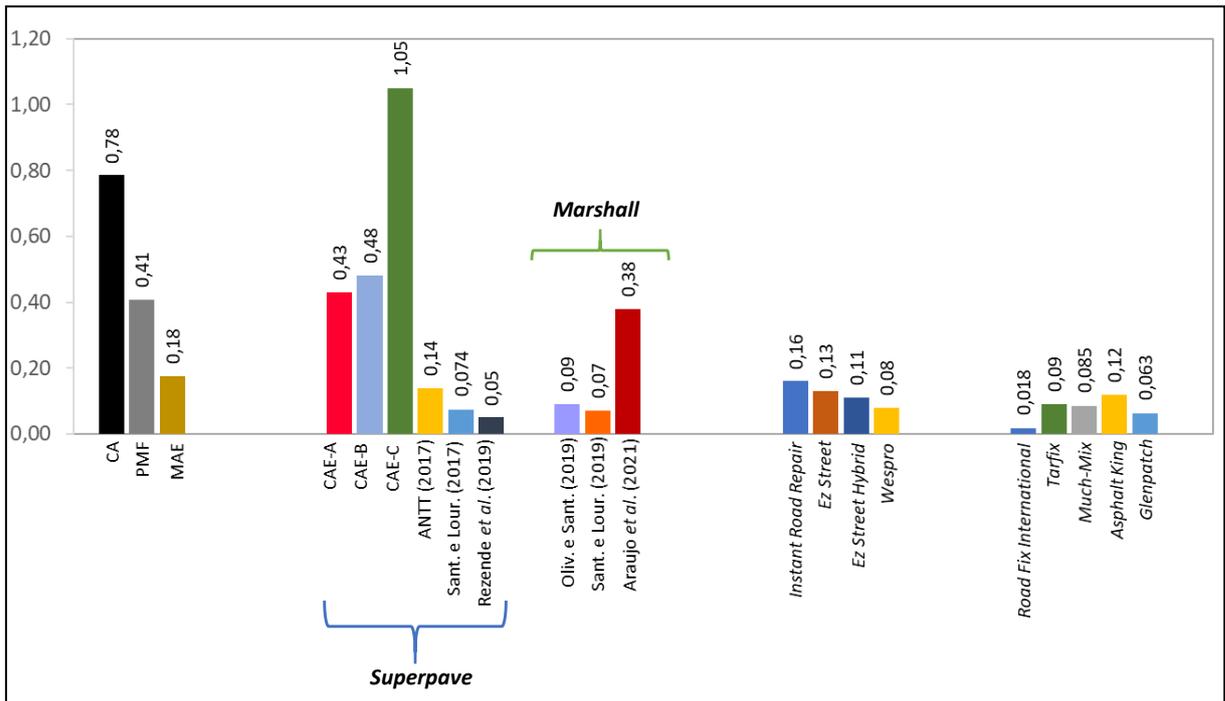


Figura 33 - Resultados médios de RT do presente estudo e de diferentes pesquisas com a MAE



Ao se comparar a MAE com estudos anteriores que utilizaram a compactação giratória com este tipo de mistura, com 0,18 MPa, a MAE da presente pesquisa apresentou valores superiores ao de ANTT (2017), média de 0,14 MPa para um tempo de 30 dias de estocagem após a usinagem. O resultado do presente estudo também foi superior aos encontrados por: Santana e Lourenço (2017), 0,074 Mpa, e Rezende *et al.* (2019) com 0,05 MPa. Entretanto a mistura de referência obteve RT inferior em comparação com os resultados de diferentes tipos de Concreto Asfáltico Estocável (CAE) estudados por De Carvalho *et al.* (2020), sendo 0,39 MPa o menor valor, referente ao CAE-A com cura.

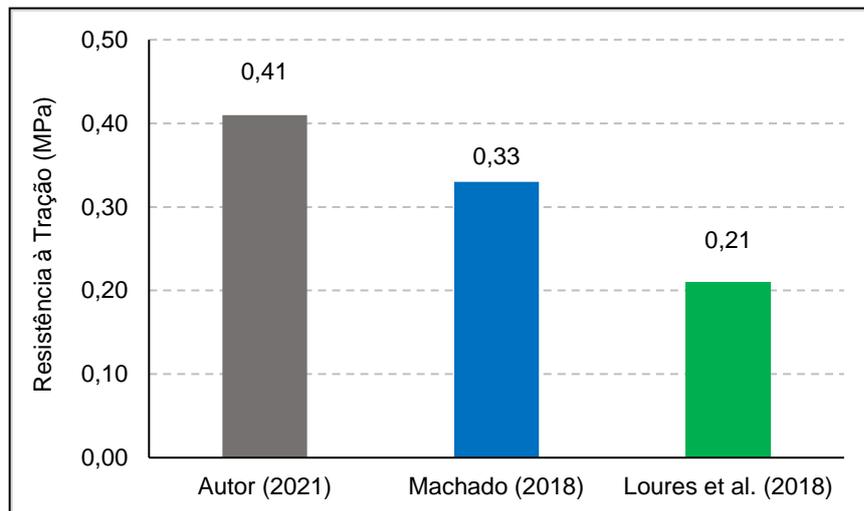
Comparando-se os resultados de RT da MAE com os valores de RT provenientes da compactação Marshall de estudos anteriores, percebe-se que a forma de moldagem das amostras não os influenciou. Os valores desse estudo foram superiores aos dos estudos de Oliveira e Santana (2019), 0,09 MPa moldados à frio com 75 golpes/face, e de Santana e Lourenço (2017), que obteve maior valor de RT Marshall 0,07 MPa para CPs moldados a 75 golpes/face. Todavia, a compactação giratória não foi suficiente para superar os valores de Araujo *et al.* (2021), 0,38 MPa de CPs moldados com 75 golpes/face proveniente de uma MAE com 90 dias de idade de fabricação.

No âmbito internacional, a RT de 0,18 MPa da MAE do presente estudo foi superior à RT de todos os tipos de misturas asfálticas ensacadas estudadas por Santiago, Roldán e Priddy (2010), o qual encontrou 0,16; 0,13; 0,11 e 0,08 MPa de MAEs provenientes dos fabricantes: *Instant Road Repair*, *Ez Street*, *Ez Street Hybrid* e *Wespro* respectivamente. As MAEs ensaiadas por Munyagi (2006) também não superaram a do presente estudo. A autora encontrou 0,018; 0,090; 0,085; 0,12 e 0,063 MPa para as misturas dos fabricantes: *Road Fix International*, *Tarfix*, *Much-mix*, *Asphalt King* e *Glenpatch* respectivamente.

Com 0,41 MPa, o PMF obteve menores valores de RT se comparado com os resultados de Moreira, Nascimento e Soares (2005), 1,07 MPa no menor teor de emulsão RL-1C, com compactação giratória. A utilização de Cimento Portland como material de enchimento pode ter conferido maior resistência à mistura do autor.

Os valores de RT do PMF também foram superiores, mas não tão distantes, à resultados de pesquisas que utilizaram a dosagem Marshall, emulsão RL-1C e 75 golpes/face para a confecção da mistura. A comparação pode ser visualizada através da Figura 34.

Figura 34 – Valores médios de RT SUPERPAVE do presente estudo com valores médios de RT Marshall de estudos anteriores com o PMF



É o caso de Machado (2018), que obteve 0,33 MPa para o PMF convencional (enquadrado na faixa D da especificação DNIT 153/2010) e de Loures *et al.* (2018), 0,24 MPa para um PMF sem escória de aciaria (enquadrado na faixa C da especificação DNIT 153/2010).

Tabela 13 – medidas de dispersão dos valores de RT

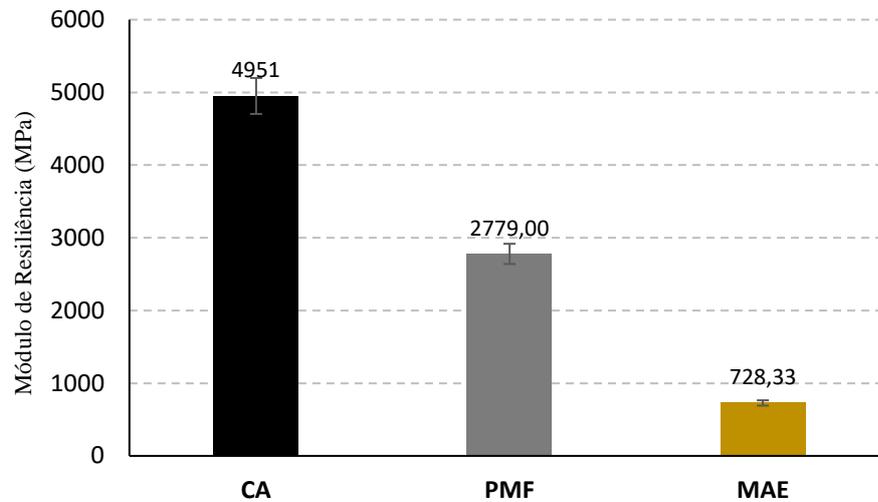
Estudo	CP I	CP II	CP III	CP IV	média (MPa)	DP	CV (%)
CA Autor (2021)	0,71	0,86	0,78	-	0,78	0,08	10,26
PMF Autor (2021)	0,44	0,36	0,42	-	0,41	0,04	9,76
MAE Autor (2021)	0,19	0,17	0,17	-	0,18	0,01	5,56
Araujo <i>et al</i> (2021)	0,37	0,40	0,37	-	0,38	0,02	5,57
ANTT (2017)	0,149	0,143	0,14	0,126	0,14	0,010	6,99

Da Tabela 13 infere-se que a MAE da pesquisa bem como as misturas asfálticas ensacadas de estudos anteriores, que disponibilizaram valores dos respectivos CPs, possuem valores de coeficiente de variação (CV) menores que as misturas dosadas em laboratório (CA e PMF). Este indicativo pode ser explicado pelo motivo da MAE ser um produto industrializado.

4.3. Módulo de Resiliência

Os resultados médios da triplicata para cada mistura para o ensaio de MR estão representados na Figura 35. A carga de ensaio foi de 10% da RT obtida. Pode-se observar que a diferença dos módulos de resiliência entre as misturas é acentuada. De acordo com Bernucci *et al.* (2008) os valores típicos de misturas asfálticas a 25°C estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa, sendo que valores menores indicam misturas mais flexíveis e valores maiores, misturas mais rígidas. Os valores encontrados para o CA e o PMF nesta pesquisa, 4951 MPa e 2779 MPa respectivamente, permaneceram dentro do intervalo citado.

Figura 35 - Módulo de Resiliência das misturas asfálticas



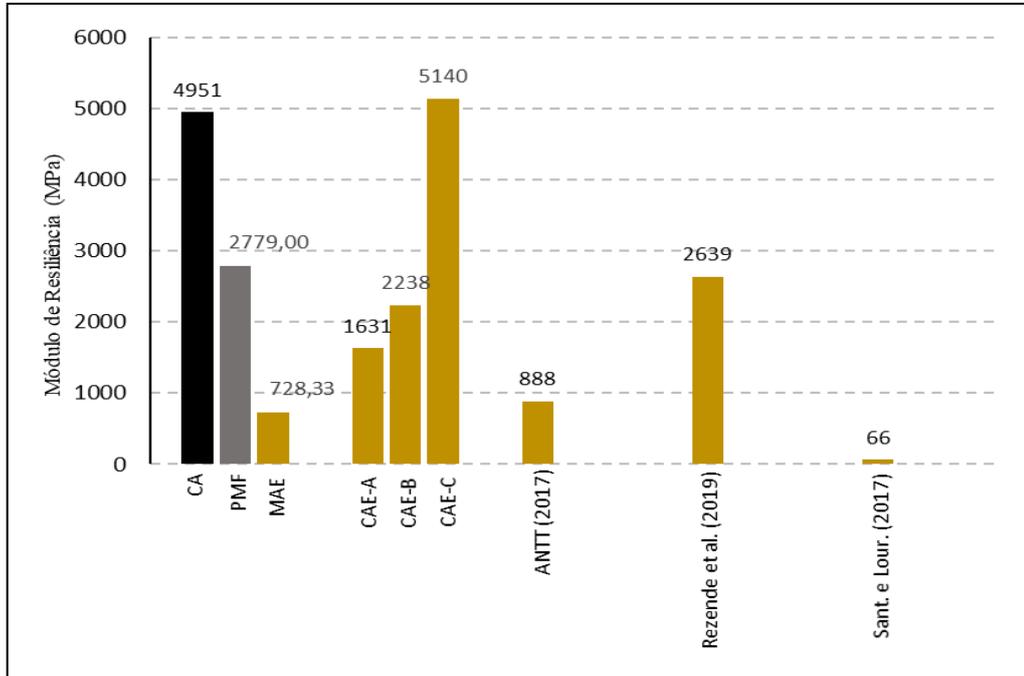
Como dito no item 3.2.4.2, um dos fatores que podem influenciar no MR de uma mistura asfáltica é a composição granulométrica (quanto mais grossa a composição, maior o MR). Porém todas as misturas, apesar de MAE e misturas de controle possuírem agregados de naturezas distintas, possuem esqueletos pétreos similares, podendo ser, portanto, a temperatura de compactação e o tipo de ligante asfáltico um dos principais responsáveis pela diferença dos valores. É válido ressaltar que com o tempo prolongado de armazenamento dos materiais, em virtude da pandemia, possibilitaram o envelhecimento dos ligantes das misturas, o que pode ter resultado em redução da penetração e aumento da viscosidade, principalmente da emulsão RL-1C contida no PMF por conta da evaporação da água, fatores que elevam o MR de uma mistura asfáltica.

A MAE apresentou o menor valor de MR dentre as misturas avaliadas, muito aquém às exigências das especificações, o que acentua o seu comportamento mecânico insatisfatório com MR de 728,33 MPa.

Com base na Figura 36, MAE da presente pesquisa aponta resultado inferior ao de ANTT (2017), MR médio de 888 MPa com 30 dias de estocagem, ao de De Carvalho et al. (2020), 1553 MPa para o CAE A (menor resultado dentre os três tipos de CAE estudados) e ao de Rezende *et al.* (2019), 2369 MPa na condição sem cura. Entretanto, a mistura teve MR superior ao de Santana e Lourenço (2017), que obtiveram apenas 66 MPa. Desse modo, fica evidente a heterogeneidade do MR nas pesquisas nacionais realizadas até o momento com a MAE. Cada pesquisa desenvolvida com a mistura ensacada até aqui citada utilizou uma mistura diferente,

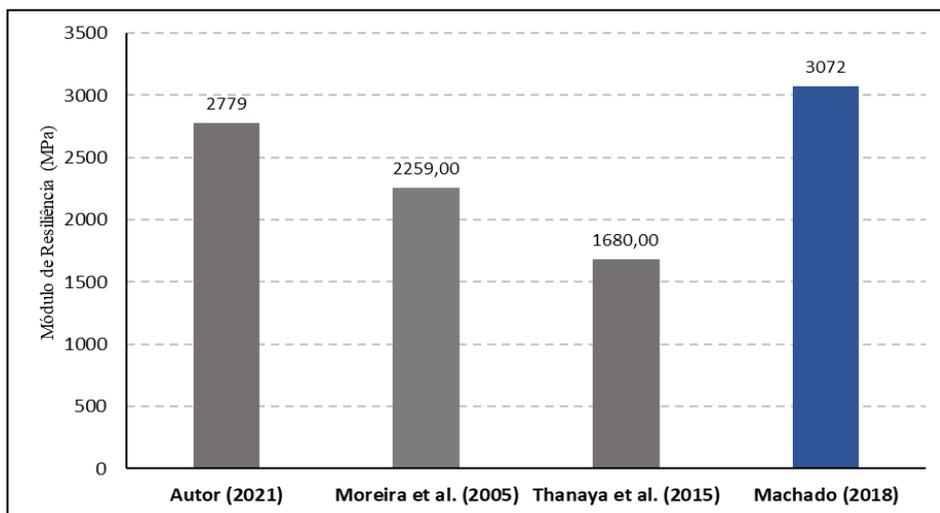
isso demonstra sim a necessidade urgente de normatização com a adoção de parâmetros mínimos de resistência e deformabilidade para a mistura.

Figura 36 - Resultados médios de MR do presente estudo e de diferentes pesquisas com a MAE



Infere-se da Figura 37 que o resultado de MR para o PMF, compactado pela metodologia SUPERPAVE, mostrou-se superior quando comparado com os resultados médios de Moreira *et al.* (2005), 2259 MPa médios, e de Thanaya *et al.* (2015), 1680 MPa e inferior ao MR médio de Machado *et al.* (2018).

Figura 37 - Valores médios de MR SUPERPAVE do presente estudo com valores médios de MR Marshall de estudos anteriores com o PMF

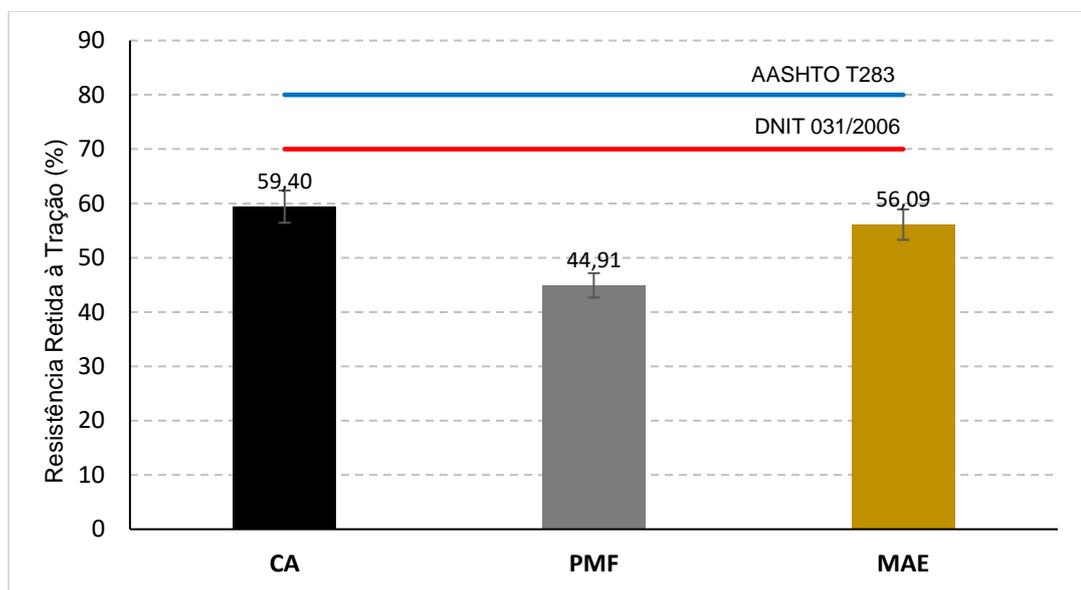


4.4. Dano por Umidade Induzida (DUI)

A Razão de Resistência à Tração (RRT) retida para uma média de três CPs por mistura referente ao ensaio de Dano por Umidade Induzida apresenta-se na Figura 38 abaixo.

A especificação da AASHTO T283/2002 indica que a RRT mínima através do método de dosagem SUPERPAVE deve ser de 80% e a especificação do DNIT 31 (DNIT, 2006) preconiza que a mesma deve ser superior a 70%.

Figura 38 - Resistência à Tração Retida das misturas asfálticas



Os resultados indicam que nenhuma das misturas asfálticas atingiram os limites mínimos exigidos pelas normas, o que indica baixa adesividade e coesão entre os agregados e o ligante asfáltico. Santiago, Roldán e Priddy (2010) relatam que a perda de adesividade se deve ao fato de a água ficar entre o asfalto e o agregado e remover a película de asfalto. Já a perda de coesão, deve-se ao amolecimento do cimento asfáltico na presença de água, o que enfraquece a ligação entre o cimento asfáltico e o agregado. A proximidade da RRT da MAE com o CA pode ser um indicativo de que o ligante asfáltico utilizado em ambas pode ter sido o CAP 50/70, com adição de aditivo no ligante da MAE.

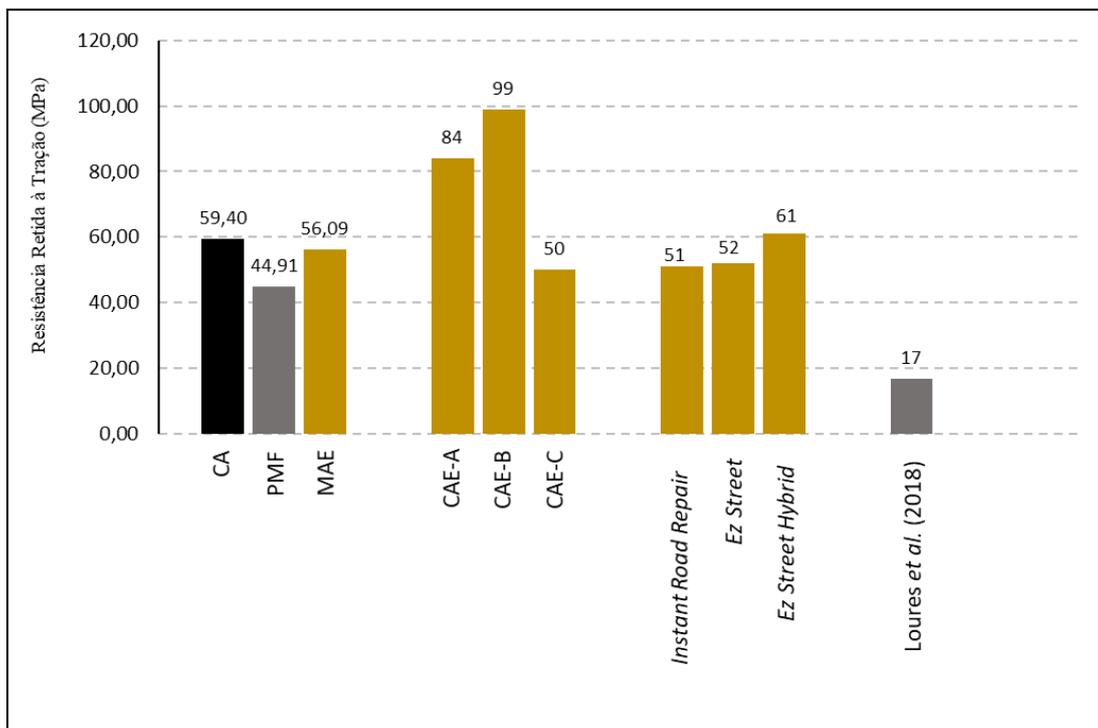
Munyagi (2006) complementa que assim como a compactação inadequada, se as misturas frias forem usadas para tapar buracos que foram formados devido à má

drenagem da água, a remoção dos agregados da mistura será mais significativa, pois esse material é mais suscetível ao descascamento em presença de água.

O CA dentre as misturas, teve maior resistência à ação deletéria da água, ou seja, o efeito da umidade na resistência à tração desse material é menor do que nos outros. Logo após vem a MAE, que superou a RRT do PMF em 25%. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de ainda ter permanecido certa fração de agente emulsificante da emulsão asfáltica nos CPs de PMF, o qual, possibilita a mistura do asfalto com a água.

Pode-se observar da Figura 39 que De Carvalho *et al.* (2020) encontrou para as misturas asfálticas ensacadas de sua pesquisa, valores de RRT de 84, 99 e 50% referente às misturas A, B e C respectivamente. Já Santiago, Roldán e Priddy (2010) encontraram para as misturas asfálticas ensacadas de sua pesquisa valores de: 51% para o material do *Instant Road Repair*, 52% do *Ez Street* e 61% do *Ez Street Hybrid*. A MAE do presente estudo alcançou RRT de 56,09%, sendo, portanto, maior que a mistura C e maior que as misturas do *Instant Road Repair* e do do *Ez Street*.

Figura 39 - Resultados médios de DUI da pesquisa atual e de diferentes pesquisas com a MAE



Também da Figura 39 infere-se que, com 44,91%, o PMF apresentou valor superior ao encontrado Loures *et al.* (2018), que encontrou 16,67% de RRT para um PMF dosado pela metodologia Marshall com RL-1C sem adição de escória de aciaria.

O fato dos valores de RRT da MAE estarem bem próximos aos do CA, tende levar a conclusão de que suportar bem a ação deletéria da água pode ser válida para a MAE. Porém essa hipótese pode não ser válida. De acordo com o Munyagi (2006), uma das maneiras mais eficazes de melhorar a vida útil dos remendos de pavimentos é secar o orifício antes da colocação do material. Em sua pesquisa, ela registrou que as misturas frias mostraram uma melhoria na vida útil de 2,5 vezes quando compactados em buracos secos.

4.5. Fadiga por compressão diametral

Em virtude de ser um ensaio que requer maior tempo de execução e a grande diferença mecânica já observada nos ensaios anteriores entre o CA e as misturas frias, decidiu-se realizar o ensaio de vida de fadiga apenas com as misturas frias.

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), a razão MR/RT representa um indicador da vida de fadiga de misturas asfálticas compactadas, uma vez que este índice engloba os dados de rigidez e de resistência do material. Devido à necessidade de revestimentos asfálticos com baixa rigidez, é preferível, por um lado, uma menor magnitude dessa razão, pois elevada razão MR/RT reflete um material que absorve em excesso as tensões que levam ao trincamento prematuro do revestimento. Por outro lado, maior resistência à tração na ruptura é um aspecto favorável justamente por conferir maior resistência à fadiga.

Para fins comparativos, apresentam-se, na Tabela 15, os resultados de propriedades mecânicas das misturas asfálticas ensaiadas nesta pesquisa e de estudos similares aos contemplados nesse trabalho, também baseados na compactação SUPERPAVE e destinados à faixa granulométrica C.

Tabela 14 - Relação MR/RT de diferentes autores para a MAE

Autor	Mistura	MR	RT	MR/RT
Autor (2021)	CA	4951	0,78	6307,03
	PMF	2779	0,41	6832,71
	MAE	728	0,18	4128,87

	CAE A	1631	0,43	3793,02
De Carvalho <i>et al.</i> (2020)	CAE B	2238	0,48	4144,00
	CAE C	5140	1,05	4895,24
ANTT (2017)	MAE	888	0,14	6342,86

A partir da análise da Tabela 15 observa-se que a maioria das misturas asfálticas ensacadas possuem razão MR/RT entre 4000 e 5000 com exceção de ANTT (2017), que assim como as misturas de CA e de PMF, foi uma MAE dosada em laboratório. Leite *et al.* (2000), Pinheiro *et al.* (2003) e Machado *et al.* (2017) estimam que misturas com razão MR/RT da ordem de 3000 são adequadamente flexíveis e resistentes aos esforços de tração. Dessa forma, todas as misturas apresentam comportamento rígido, sendo suscetíveis a baixa resistência à fadiga. É importante ressaltar que são misturas ensacadas distintas e sem padronização alguma atualmente.

O ensaio foi executado através de duas formas: em termos de diferença de tensões e de deformação específica. O método de ensaio DNIT 184 (DNIT, 2018) preconiza que devem ser escolhidos quatro níveis de tensão entre 5 a 40% da RT. Na pesquisa vigente, foram escolhidas tensões de 25, 30, 35 e 40% da RT. As curvas de vida de fadiga estão representadas nas Figuras 40 e 41 enquanto que as equações que melhor se adequaram às linhas de tendência estão representadas nas Tabelas 12 e 13.

Infere-se dos resultados das Tabelas 16 e 17 que os valores de R^2 foram superiores a 0,7 apontando bom ajuste dos modelos em relação aos pontos obtidos em ensaio, tendo o PMF valor mais próximo de 1 no método das diferenças de tensões.

Figura 40 - vida de fadiga da MAE e do PMF em função da diferença de tensões

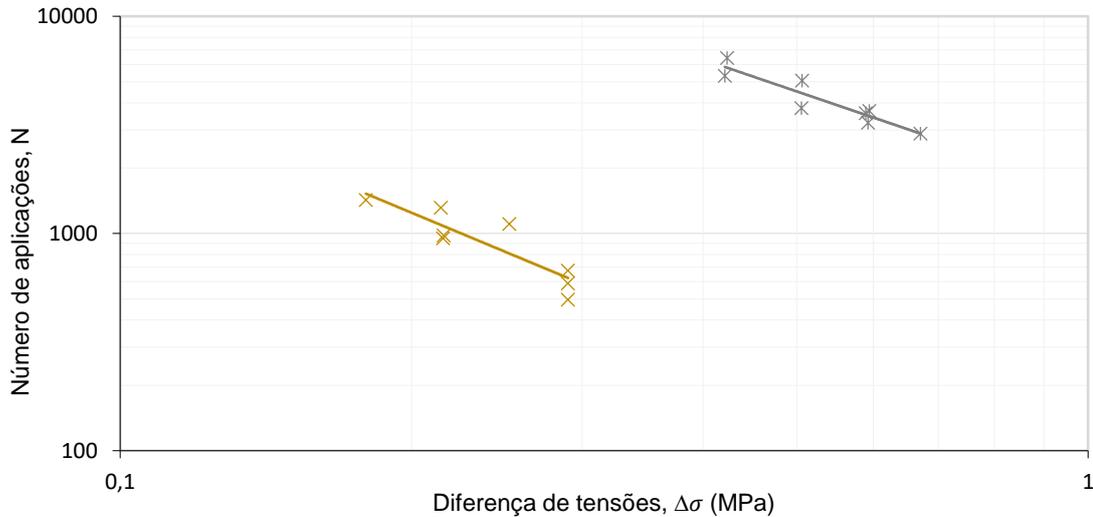


Tabela 15 - Modelo de vida de fadiga da MAE e do PMF em termos de diferença de tensões

Amostra	Modelo	R ²	k ₁	n ₁
PMF	$N = 1574,2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{-1,518}$	0,8629	1574,2	1,518
MAE	$N = 62,648 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{-1,858}$	0,7801	62,648	1,858

Carvalho (2018) e Guerra (2019) dosaram além dos CPs de CA com ligantes modificados, CPs com aproximadamente 5% de CAP convencional 50/70 e matriz granular superior enquadrada dentro da Faixa C. Encontraram valores de n₁ de 9,702 e 10,26 respectivamente, valores muito superiores aos obtidos pelo PMF e MAE, que como esperado, obtiveram baixo coeficiente angular (n₁), módulo de 1,518 e 1,858 respectivamente, o que indica baixa suscetibilidade à fadiga de ambas as misturas.

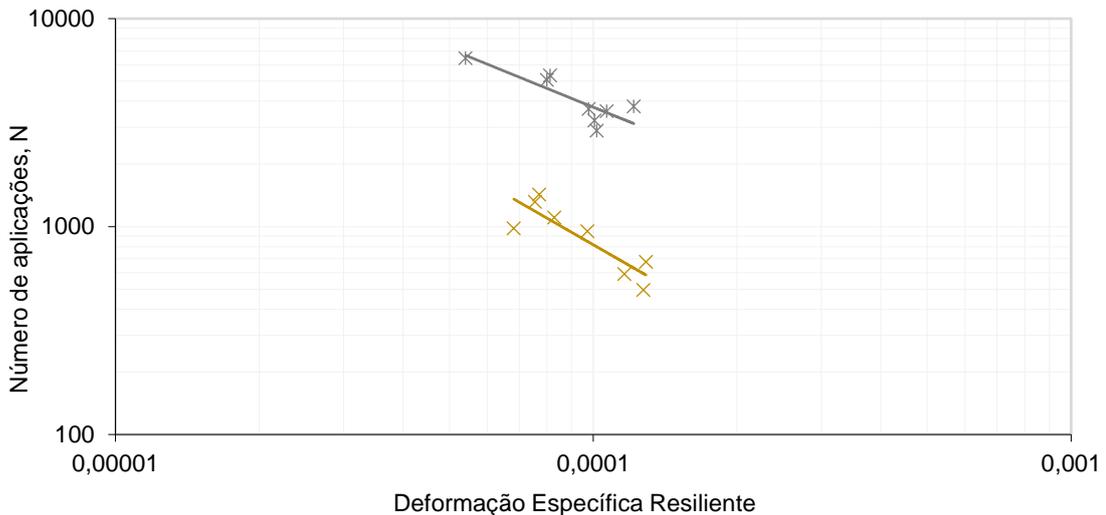
A MAE apresentou ruptura para níveis mais baixos de tensão, suportando menor número de ciclos que o PMF, o qual suportou maior número de ciclos para níveis maiores de tensão. Desta forma, constata-se que a MAE não é indicada para vias de tráfego alto nem médio, pois apresenta elevada rigidez. Uma frequência maior de veículos implica em maior quantidade das solicitações de tração, as quais a MAE não possui flexibilidade suficiente para suportar.

Tabela 16 - Modelo de vida de fadiga da MAE e do PMF em termos da deformação específica

Amostra	Modelo	R ²	k ₂	n ₂
---------	--------	----------------	----------------	----------------

PMF	$N = 0,7014 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{-0,932}$	0,7139	0,7014	0,932
MAE	$N = 0,0043 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{-1,321}$	0,7593	0,0043	1,321

Figura 41 - Modelo de fadiga da MAE e do PMF em função da deformação específica resiliente



Da Tabela 17 infere-se que a MAE é uma mistura menos rígida que o PMF, implicando em ruptura precoce. Isso pode ser verificado através do seu valor de n_1 e n_2 que são mais altos que o PMF.

Referente à Figura 41 pode ser visto claramente que o PMF precisa de uma quantidade de aplicações cíclicas de carga muito maior que a MAE para ter a mesma deformação específica. Enquanto a MAE precisou de 800 ciclos para ter uma deformação específica de 0,0001, o PMF, para obter essa mesma deformação, necessitou de cerca de 3700 ciclos.

Com n_1 de 1,518, o PMF dessa pesquisa foi menor que o de Machado (2018), que em sua pesquisa, encontrou n_1 de 1,763 para PMFs Marshall densos convencionais, e maior que o de Loures *et al.* (2018) que encontrou n_1 de 1,188 para PMF Marshall sem escória. Constata-se então que a forma de compactação das misturas não é um fator preponderante para a vida de fadiga do material, mas todo o conjunto citado por Costa (2017) no item 3.2.4.2. Ou seja, o material necessita ter baixa rigidez e elevada resistência a tração na ruptura.

5. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi verificar o comportamento físico e mecânico de uma Mistura Asfáltica Ensacada em comparação às misturas asfálticas do tipo PMF e CA. Ao final deste estudo, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- A MAE do estudo não teve desempenho mecânico similar sequer a um PMF, estando conseqüentemente bem abaixo da similaridade com um CA, como prometem os fabricantes deste tipo de mistura.
- A MAE apresentou curva granulométrica e teor de ligante dentro do limite estabelecido pela especificação DNIT 031/2006
- O número de giros no CGS para a compactação da MAE e das misturas de controle foi de 100 giros. A partir dessa quantidade a MAE não apresentou significativa redução de vazios
- Ensaio de RT: apenas o CA atingiu o mínimo preconizado pela especificação de serviço do DNIT. Quanto maior o percentual de vazios da mistura, menor a RT, desta forma a MAE teve o menor valor de RT, estando 2,3 vezes abaixo do PMF.
- Ensaio de MR: o maior valor de MR para o CA pode ter sido devido à temperatura de compactação. A MAE apresentou o menor valor dentre as 3 misturas, estando 3,8 vezes abaixo do PMF. Tipo, teor e envelhecimento do ligante bem como elevado volume de vazios podem ter cooperado.
- Ensaio de Dano por umidade Induzida: a proximidade da RRT da MAE com o CA pode ser um indicativo de que o ligante asfáltico utilizado em ambas pode ter sido o CAP 50/70, com adição de aditivo no ligante da MAE.
- Ensaio de vida de Fadiga: a MAE é uma mistura mais rígida que o PMF, implicando em ruptura precoce.
- A compactação giratória ocasionou apenas um ligeiro aumento da rigidez do PMF, entretanto, o aumento da vida de fadiga não é função apenas do tipo de compactação, mas de todo o conjunto físico-químico da mistura asfáltica.
- A variabilidade entre os resultados dos estudos com a MAE é proveniente da inexistência de normatização para este tipo de mistura, onde, a falta de parâmetros mínimos de resistência e deformabilidade causa divergência na metodologia de produção e execução dos serviços com a MAE.

Sugestão para futuras pesquisas:

- Realizar a caracterização do ligante e dos agregados que compõem a MAE;
- Avaliar o comportamento mecânico da MAE e do PMF frente a ensaios de deformação permanente (Flow Number e Módulo Dinâmico);
- Avaliar o comportamento da MAE frente ao PMF variando-se o tempo de cura de ambas e o tipo de emulsão do PMF.
- Dosar e compactar uma MAE em laboratório e comparar as propriedades mecânicas e volumétricas da mesma com uma MAE já consolidada no mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT. **Avaliação Laboratorial das Propriedades Mecânicas de Mistura Asfáltica Estocável**. Relatório de pesquisa RDT CONCEPA/ANTT, Jun. 2017.

ABEDA. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.

AL-KHATEEB, G. G.; AL-AKHRAS, N. M. Properties of Portland cement-modified asphalt binder using Superpave tests. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 926–932, fev. 2011.

ANTT. **Relatório de Pesquisa RDT CONCEPA/ANTT AVALIAÇÃO LABORATORIAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURA ASFÁLTICA ESTOCÁVEL**. [s.l: s.n.].

ARAUJO, A. G. et al. Caracterização de mistura asfáltica ensacada para utilização em rodovias federais. **Revista Pavimentação**, p. 19–32, 2021.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. [s.l.] Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

BYZYKA, J.; RAHMAN, M.; CHAMBERLAIN, D. A. An improved interface temperature distribution in shallow hot mix asphalt patch repair using dynamic heating. <https://doi-org.ez1.periodicos.capes.gov.br/10.1080/10298436.2018.1559315>, v. 21, n. 13, p. 1617–1625, 9 nov. 2018.

CARVALHO, I. S. et al. **Estudo Preliminar de uma Mistura Asfáltica do Tipo concreto Asfáltico Estocável**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano. **Anais...**Salvador: 2018

CARVALHO, J. R. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

CHAVES, F. J. **Estudo de Misturas de Areia Asfalto a Frio em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego no Estado do Ceará - Contribuição ao Método de Dosagem**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

CNT. Transporte rodoviário. **Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?**, p. 162, ago. 2017.

CNT. CNT: Transporte Atual. **Piora a qualidade**, p. 84, out. 2019.

CNT. **Investimento em transporte neste ano será o menor em duas décadas**. Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/investimento-em-transporte-neste-ano-sera-o-menor-em-duas-decadas>>. Acesso em: 18 ago. 2021.

DE CARVALHO, I. S. et al. Estudo do Concreto Asfáltico Estocável. **Revista Materia**, v. 25, n. 4, p. 1–22, 2020.

DIAZ, L. G. Creep performance evaluation of Cold Mix Asphalt patching mixes. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 9, n. 2, p. 149–158, mar. 2016.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, ME 107/94. Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica - ensaio Marshall. Rio de Janeiro: [s.n.].

DNIT. Manual de pavimentação. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ES - 031/2006. Pavimentos flexíveis - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: [s.n.].

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ES - 153/2010. Pavimentação asfáltica - Pré-misturado a frio com emulsão catiônica convencional- Especificação de serviço. Rio de Janeiro: [s.n.].

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ES - 165/2013. Emulsões asfálticas para pavimentação - Especificação de material. Rio de Janeiro: [s.n.].

DONG, Q. et al. Development of a Turpentine Cutback Asphalt Mixture for Porous Pavement Pothole Repair. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 3, p. 05020001, 8 jan. 2020.

DU, S. Interaction mechanism of cement and asphalt emulsion in asphalt emulsion mixtures. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, 2014.

FERROTTI, G.; PASQUINI, E.; CANESTRARI, F. Experimental characterization of high-performance fiber-reinforced cold mix asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 57, p. 117–125, abr. 2014.

FLORES, G. et al. Cold asphalt mix with emulsion and 100% rap: Compaction energy and influence of emulsion and cement content. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118804, jul. 2020.

GRECA, A. Fatos & Asfaltos. Especial: Frota GRECA Asfaltos. v. 25, p. 8, 2013.

GUERRA, T. D. **Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

JAIN, S.; SINGH, B. Cold mix asphalt: An overview. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124378, 20 jan. 2021.

JESUS, F. F. S. DE. **Estudo Comparativo entre uma Mistura Asfáltica Ensacada Comercial e um Pré-Misturado a Frio dosado em Laboratório**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil)—Cruz das Almas: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2018.

LIAO, M.-C. et al. Developing Effective Test Methods for Evaluating Cold-Mix Asphalt Patching Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 10, p. 04016108, 1 out. 2016.

LOURES, R. DE C. B. DE A. et al. Pré-misturado a frio contendo escória de aciaria: Uma alternativa viável para construção de pavimentos. **Transportes**, v. 26, n. 2, p. 54–67, 2018.

MACHADO, M. C. et al. **Avaliação De Propriedades Mecânicas De Misturas**

Asfálticas a Quente Dosadas Pela Metodologia Superpave. XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. **Anais...**Recife: 2017

MACHADO, M. C. **Comportamento Mecânico de Pré-Misturados a Frio Densos com Emulsões Asfálticas Convencional e Modificada por Polímero com e sem Geossintético.** Dissertação - Mestrado em Engenharia Civil—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2018.

MOREIRA, H. S.; NASCIMENTO, D. R. DO; SOARES, J. B. **Comparação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Frio Compactadas por Impacto e por Amassamento.** [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2005.

MOTTA, R. DOS S. **Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2011.

MUNYAGI, A. A. **Evaluation of Cold Asphalt Patching Mixes.** Thesis - Masters in Engineering—Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2006.

OLIVEIRA, A. G. B. **Estudos Preliminares de Mistura Asfáltica do tipo CBUQ Estocável para uso em Pavimentação no Estado de Goiás.** Monografia - Graduação em Engenharia Civil - Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2017.

OLIVEIRA, Á. R.; SANTANA, C. S. A. **Estudo Comparativo das Características Físicas e Mecânicas de um Concreto Asfáltico Estocável e Concreto Asfáltico Usinado a Quente Convencional.** 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. **Anais...**Balneário Camburiú: 2019

REZENDE, D. A. T. et al. **Caracterização amostral de Concreto Asfáltico Estocável por meio de ensaios laboratoriais.** 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. **Anais...**Balneário Camburiú: 2019

ROCHA, R. R. **Estudo da Prevenção de Trincas de Reflexão em Pavimentos Semi-rígidos.** Monografia - Graduação em Engenharia Civil - São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2009.

SANTANA, A. C. S. T.; LOURENÇO, V. M. DE Q. **Análise das propriedades físicas**

e mecânicas de mistura asfáltica usinada à quente ensacada para aplicação à frio. XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. **Anais...**Recife: 2017

SANTANA, H. **Manual de Pré-Misturados a Frio.** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, 1993.

SANTIAGO, M. M.; ROLDÁN, F. DEL V.; PRIDDY, L. P. **Certification Tests on Cold Patch Asphalt Repair Materials for Use in Airfield Pavements Geotechnical and Structures Laboratory Certification Tests on Cold Patch Asphalt Repair Materials for Use in Airfield Pavements.** Vicksburg: [s.n.].

Scottish company introduces US pothole repair product. Disponível em: <<https://www.theconstructionindex.co.uk/news/view/scottish-company-introduces-us-pothole-repair-product>>. Acesso em: 5 ago. 2021.

SHANBARA, H. K.; RUDDOCK, F.; ATHERTON, W. A viscoplastic model for permanent deformation prediction of reinforced cold mix asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 287–302, out. 2018.

SIANO, A. et al. **Manual de Procedimentos - Conservação de vias Urbanas (Tapa Buracos).** São Paulo: [s.n.].

THANAYA, I. N. A.; ZOOROB, S. E.; FORTH, J. P. A laboratory study on cold-mix, cold-lay emulsion mixtures. **Transport**, v. 162, n. 1, p. 47–55, 25 maio 2009.

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. Nonlinear viscoelastic analysis of asphalt cement and asphalt mastics. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 6, p. 510–529, 3 jul. 2015.

VAITKUS, A.; PERVENECKAS, Z. ANALYSIS AND EVALUATION OF POSSIBILITIES FOR THE USE OF WARM MIX ASPHALT IN LITHUANIA. v. 4, n. 2, p. 80–86, 2009.

WANG, X. et al. Material Properties of Porous Asphalt Pavement Cold Patch Mixtures with Different Solvents. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 10, p. 06020015, 27 jul. 2020.

ZHANG, Z.; WANG, S.; LU, G. Properties of new cold patch asphalt liquid and mixture modified with waterborne epoxy resin. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, n. 13, p. 1606–1616, 9 nov. 2019.