

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Victória Pilar Saldanha

**DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS 100% RAP COM ADIÇÃO
DE EMULSÃO ASFÁLTICA COMO CAMADA DE BASE**

Santa Maria, RS
2023

Victória Pilar Saldanha

**DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS 100% RAP COM ADIÇÃO DE
EMULSÃO ASFÁLTICA COMO CAMADA DE BASE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Engenheira Civil.**

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht
Coorientadora: Ma. Chaveli Brondani

Santa Maria, RS
2023

Victória Pilar Saldanha

**DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS 100% RAP COM ADIÇÃO DE
EMULSÃO ASFÁLTICA COMO CAMADA DE BASE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Engenheira Civil.**

Aprovado em 19 de julho de 2023:

Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Chaveli Brondani, Ma. (UFSM)
(Coorientadora)

Tatiana Cureau Cervo, Dra. (UFSM)

Eduarda Fração Santos, Eng. Ma.

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso meu agradecimento a Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram incondicionalmente em todas as etapas da minha vida, que mesmo longe se fizeram presentes. À minha mãe, Marta, por lutar diariamente para me proporcionar o privilégio de realizar meus sonhos e por ser meu porto seguro. Ao meu pai, Milton, por acreditar no meu potencial e me ajudar no que for preciso.

Aos meus tios, tias e primos, que sempre acreditaram em mim e me incluíram em suas orações, além de compreenderem a minha ausência enquanto eu me dedicava às obrigações da faculdade. Aos meus avós de coração, Zélia e Jarbas, juntamente com minha dinda Diely, por me incentivarem a buscar sempre mais em relação aos estudos e sempre cuidarem da minha mãe quando eu estava longe.

Ao meu namorado, Júlio, por estar ao meu lado e por fazer tudo que está ao seu alcance para que minha vida seja mais leve e feliz. Obrigada amor, por ser tão compreensivo nesse momento, por todos os dias que acordou mais cedo para me dar carona pro laboratório, por ouvir minhas reclamações e fazer piada disso para me tirar um sorriso, por me acompanhar na mudança para Porto Alegre para realizar meu estágio final de graduação. Com você tudo fica mais leve!

Aos meus amigos de Santa Maria e Manoel Viana, agradeço por toda força, apoio, por entenderem os momentos de ausência durante o período do TCC e nunca deixarem de me incentivar a concluir esta etapa importante da minha formação. Em especial, agradeço minhas amigas queridas, Amanda, Schai, Thaíse, Paola, Bethânia, Nathalia que estão sempre comigo e me ouviram reclamar do TCC em todos os encontros que tivemos esse ano, obrigada amigas pela paciência e compreensão.

Aos meus sogros, Nina e Marques, que muitas vezes desempenharam o papel de pais para mim aqui em Santa Maria e sempre estão sempre torcendo pelo meu sucesso. Estendo esse agradecimento à toda família, vocês foram essenciais.

Aos amigos e colegas, especialmente, Andressa, Bibiana, Giovanna, Kiara e Mikael pelo companheirismo de todos os dias desde o início da faculdade. Gio, minha dupla, agradeço por tudo que passamos juntas nesses anos. “Amizades como a de vocês não vale a pena, vale a galinha inteira”.

Ao pessoal do GEPPASV, Sílvio, Renan, Pedro, Cleber, Lorenzo, Júnior, Alana, Gabriela, Jéssica, Jennifer, sou grata por todos os ensinamentos e momentos felizes

compartilhados, sem vocês a realização deste trabalho não seria possível. Agradeço pela oportunidade de ter aprendido e convivido com pessoas excelentes no que fazem. Gostaria de agradecer, em especial, à Jessica Vieira, que foi fundamental para a realização deste trabalho, me ensinando e auxiliando em todas as etapas, além da parceria para realizar ensaios durante o final de semana.

Agradeço à minha coorientadora e amiga, Chaveli, por todo o conhecimento compartilhado comigo, pela disponibilidade em me ensinar tudo que foi preciso para realizar este trabalho, pelas conversas e desabafos no laboratório enquanto esperávamos rodar os ensaios, por todo carinho que sempre teve por mim, desde o primeiro dia que nos conhecemos. Pequena em tamanho, mas gigante como pessoa, você é incrível.

Ao professor, Luciano Specht, por ter sido meu orientador e me dar todo o suporte com suas correções, incentivos e conhecimento.

À empresa Pavesys Engenharia, que me concedeu a chance de fazer estágio supervisionado e assim conhecer mais da minha área de formação. Obrigada por confiarem nos conhecimentos que adquiri durante minha graduação. Serei sempre grata pelo carinho que recebi dos colegas de empresa, principalmente da minha gestora Rafaela e colegas de equipe, Bruno, Helena, Suelen e Juliano.

À Universidade Federal de Santa Maria por me proporcionar ensino de qualidade e gratuito, além de possibilitar meu desenvolvimento cultural, tecnológico e social. Sou muito grata também à cada membro do corpo docente, à direção e a administração do curso de Engenharia Civil.

Por fim, a todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado. Muito obrigada!

*“Porque os homens são anjos nascidos sem asas,
é o que há de mais bonito, nascer sem asas e
fazê-las crescer.”*

(José Saramago)

RESUMO

DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS 100% RAP COM ADIÇÃO DE EMULSÃO ASFÁLTICA COMO CAMADA DE BASE

AUTOR: Victória Pilar Saldanha
ORIENTADOR: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht
COORDINADORA: Ma. Chaveli Brondani

A reciclagem de pavimentos tem demonstrado potencial para melhorar a qualidade dos pavimentos, com resultados satisfatórios em termos de desempenho mecânico e durabilidade. Diante da relevância desse tema e da crescente utilização de misturas asfálticas recicladas, torna-se essencial aprofundar o conhecimento sobre seu desempenho mecânico e compreender o comportamento dessas misturas sob diferentes condições, para garantir ainda mais a sua eficácia e segurança na aplicação em obras rodoviárias. Atualmente, existem as mais diversas técnicas de reciclagem, neste trabalho avaliou-se o desempenho mecânico de misturas recicladas a frio com uso de material fresado e emulsão asfáltica, para emprego como camada de base. O material fresado é do tipo RAP-BR290, proveniente de processos de manutenção e conservação rodoviárias no trecho da rodovia BR-290/RS. As emulsões usadas são do tipo de ruptura lenta com e sem agente rejuvenescedor. As amostras foram moldadas empregando o processo de compactação por energia modificada. Foram realizados ensaios triaxiais de cargas repetidas para obtenção dos módulos de resiliência (MR). Foi feita uma comparação dos valores de MR com os módulos da mistura M5-100% RAP-BR avaliado na dissertação de mestrado de Santos (2021), que possui o mesmo material reciclado, só que sem adição de emulsão. Foi realizada também a análise mecanicista comparativa, empregando o MeDiNa, dos materiais estudados neste trabalho com o material M5-100% RAP-BR. A partir destas análises, as estruturas analisadas obtiveram redução de espessuras nas camadas de revestimentos, menor porcentagem de área trincada, atingindo vida útil maior.

Palavras-chave: Reciclagem de pavimentos. Emulsão asfáltica. Ensaio triaxiais de cargas repetidas. Medina.

ABSTRACT

MECHANICAL PERFORMANCE OF 100% RAP MIXTURES WITH ADDITION OF ASPHALT EMULSION AS BASE LAYER

AUTHOR: Victória Pilar Saldanha
ADVISOR: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht
COADVISOR: Ma. Chaveli Brondani

Pavement recycling has shown potential to improve the quality of pavements, with satisfactory results in terms of mechanical performance and durability. Given the relevance of this topic and the increasing use of recycled asphalt mixes, it is essential to deepen knowledge about their mechanical performance and understand the behavior of these mixes under different conditions, to further ensure their effectiveness and safety in road works application. Currently, there are the most diverse recycling techniques, in this work we evaluated the mechanical performance of cold recycled mixtures using milled material and asphalt emulsion, for use as a base layer. The milled material is of the RAP-BR290 type, originating from road maintenance and conservation processes on the stretch of the BR-290/RS highway. Emulsions used are slow breaking type with and without rejuvenating agent. The samples were molded using the modified energy compaction process. Triaxial tests of repeated loads were carried out to obtain the resilience modules (MR). A comparison of the MR values was made with the modules of the M5-100% RAP-BR mixture evaluated in Santos' master's thesis (2021), which has the same recycled material, only without the addition of emulsion. A comparative mechanistic analysis was also carried out, using MeDiNa, of the materials studied in this work with the M5-100% RAP-BR material. Based on these analyses, the analyzed structures obtained a reduction in the thickness of the coating layers, a lower percentage of cracked area, achieving a longer service life.

Keywords: Pavement recycling. Asphalt emulsion. Triaxial tests of repeated loads. Medina.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre os tipos de fresagem quanto à rugosidade resultante na pista ...	19
Figura 2 – Máquinas Fresadoras.....	19
Figura 3 – Cilindros para os 3 tipos de fresagem	20
Figura 4 - Esquema de classificação das misturas asfálticas.....	22
Figura 5 – Etapas do trabalho	24
Figura 6 – Equipamento utilizado na fresagem e tambor de fresagem. Detalhe do RAP originário da fresagem do trecho BR-290/RS	25
Figura 7 - Curva granulométrica do material “RAP-BR290” em relação à Faixa C DNIT 031/2006.....	26
Figura 8 - Curva granulométrica do material “RAP-BR290” em relação a Faixa C DNIT141/2022	27
Figura 9 - Armazenamento das emulsões asfálticas utilizadas.....	29
Figura 10 – Mistura e equipamentos utilizados na moldagem	31
Figura 11 – Amostras prontas – (a) Pesagem do CP (b) CPs moldados curando em estufa à 60°C (c) CPs curados após 48h.....	32
Figura 12 – Equipamento triaxial de cargas repetidas e esquema de funcionamento	33
Figura 13 – Representação Gráfica do modelo composto para mistura EM1	39
Figura 14 - Representação gráfica do modelo composto para mistura EM2.....	39
Figura 15 – Valores médios de módulo de resiliência das misturas.....	40
Figura 16 – Gráfico comparativo de valores médios de módulo de resiliência versus tensão confinante	41
Figura 17 – Gráfico comparativo de valores médios de módulo de resiliência versus tensão desvio.....	41
Figura 18 – Gráficos comparativo de área trincada.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de Reciclagem	21
Tabela 2 – Granulometria do material fresado (RAP-BR290) e faixa granulométrica de referência	26
Tabela 3 - Faixa granulométrica de referência	27
Tabela 4 - Teor de ligante no fresado	28
Tabela 5 – Ensaio de caracterização da emulsão asfáltica catiônica estabilizante de bases granulares (E1)	28
Tabela 6 - Ensaio de caracterização do ligante asfáltico obtido por evaporação (NBR 14896)	29
Tabela 7 – Ensaio de caracterização da emulsão asfáltica com agente rejuvenescedor (E2) ..	29
Tabela 8 – Procedimento de compactação das amostras	31
Tabela 9 – Sequência de tensões para fase de condicionamento.....	34
Tabela 10 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência	34
Tabela 11 – Situações de tráfego e tipos de revestimentos	35
Tabela 12 – Dados do “Solo Horizonte B” usados para análise no MeDiNa.....	36
Tabela 13 – Amostras válidas para o ensaio triaxial	37
Tabela 14 – Valores de módulo de resiliência - EM1	37
Tabela 15 - Valores de módulo de resiliência – EM2	38
Tabela 16 - Modelo de previsão de módulo de resiliência	39
Tabela 17 – Dimensões das camadas do pavimento para cada situação	42
Tabela 18 - Dimensionamento conforme MeDiNa	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.2	OBJETIVOS	12
1.2.1	Objetivo Geral	12
1.2.2	Objetivos Específicos	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	14
2.1.1	Método Empírico (DNER)	14
2.1.2	Método Mecânico-Empírico (MeDiNa)	15
2.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS.....	16
2.2.1	Rigidez	16
2.2.1.1	Módulo de Resiliência	17
2.3	FRESAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	18
2.3.1	Técnicas e tipos de fresagem	19
2.3.2	Equipamentos	19
2.3.2.1	Máquina Fresadora	19
2.3.2.1	Cilindro Fresador.....	20
2.4	RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	20
3	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA	24
3.1	MATERIAIS	25
3.1.1	<i>Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)</i>	25
3.1.2	Emulsões Asfálticas	28
3.1.3	Água	30
3.2	MÉTODOS	30
3.2.1	Moldagem dos corpos de prova	30
3.2.2	Ensaio triaxial de cargas repetidas	32
3.2.2.1	Módulo de Resiliência	34
3.2.3	Análise Mecanicista	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	COMPORTAMENTO RESILIENTE DAS MISTURAS	37
4.1.1	Análise comparativa entre as misturas: influência do tipo de emulsão nos valores de MR	40
4.1.2	Análise comparativa das amostras com o material M5-100%RAP-BR: Influência do uso de emulsão nos valores de MR das misturas	40

4.2	ANÁLISE MECANICISTA.....	42
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o setor de pavimentação tem buscado cada vez mais soluções inovadoras e sustentáveis para enfrentar os desafios ambientais e econômicos associados à construção e manutenção de estradas. O aumento do tráfego, o término da vida útil dos pavimentos e as ações climáticas são responsáveis por estimularem a degradação dos revestimentos asfálticos, afetando a trafegabilidade. Nesse contexto, as misturas asfálticas recicladas têm se destacado como uma alternativa promissora, visto que permitem a reutilização de materiais asfálticos que já existem, o que possibilita a conservação dos recursos naturais, minimiza a geração de resíduos, além de, diminuir gastos energéticos e emissões de gases poluentes advindos do processo de produção do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

O procedimento de fresagem do revestimento asfáltico deteriorado gera um insumo denominado RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), o qual possui grande potencial de uso. Estudos desenvolvidos com objetivo de compreender o comportamento de misturas utilizando o RAP cada vez mais são retratados pela literatura científica, além da qualidade que os materiais reciclados podem apresentar, quando empregados da maneira certa, a sua utilização contribui para solucionar o passivo ambiental das empresas da área, além de diminuir o consumo de agregados virgens (TANSKI, 2016).

Dentre as diversas técnicas de reciclagem existentes, destaca-se a reciclagem a frio, que ainda não é totalmente difundida no Brasil. Por esse motivo, são desenvolvidas pesquisas com o objetivo de entender o comportamento mecânico desses materiais para considerá-los de forma correta nos projetos de pavimentação. Nesse cenário, a aplicação de misturas asfálticas recicladas a frio com emulsão demonstra ser uma alternativa relevante para uso como camada de base de pavimentos, portanto o foco desta pesquisa está em analisar o comportamento mecânico de misturas recicladas a frio com uso de emulsão como camada de base, como também comparar o desempenho destas com misturas compostas só por RAP.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é avaliar o desempenho mecânico de misturas recicladas a frio com material fresado e emulsão usadas como camada de base de pavimentos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar o comportamento resiliente das misturas recicladas a frio por meio do ensaio triaxial de cargas repetidas;
- b) Analisar o efeito da adição de diferentes tipos de emulsão no comportamento mecânico das misturas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

“Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem” (BERNUCCI *et al.*, 2008), possuindo, segundo os autores, a função principal de garantir uma boa qualidade de rolamento com conforto, economia e segurança. É importante para o bom funcionamento do pavimento, que todos os seus componentes estejam sujeitos a deformações compatíveis com a sua natureza, para evitar rupturas ou danos prematuras em suas camadas (BALBO, 2007).

Dessa forma, o dimensionamento de um pavimento refere-se à determinação das espessuras das camadas a serem executadas, como também a composição dos materiais que serão utilizados, a fim de constituir uma estrutura que seja capaz de resistir às solicitações do carregamento imposto, sem a ocorrência de danos a cima dos limites aceitáveis para o período de projeto estabelecido (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os métodos de dimensionamento foram classificados basicamente de duas formas: empíricos e mecanístico empírico. E os principais mecanismos de degradação dos pavimentos são o trincamento por fadiga, oriundo das deformações elásticas, e o afundamento de trilha de roda, proveniente das deformações plásticas (MEDINA; MOTTA, 2015).

2.1.1 Método Empírico (DNER)

No Brasil, no início da década de 60, o engenheiro Murilo Lopes de Souza, fundamentou-se no método da USACE, com base na metodologia CBR, e elaborou o método empírico para o dimensionamento de pavimentos, adotado pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) no ano de 1981, que ficou conhecido como Método do DNER.

O Método DNER tem como base dois parâmetros de entrada: o Índice de Suporte Califórnia (CBR) e o volume de tráfego, representado pelo número equivalente às operações do eixo simples padrão durante o período de projeto, e a finalidade do método é dimensionar as camadas granulares com intuito de proteger o subleito da ruptura por cisalhamento e pode ser considerado a favor da segurança em relação ao acúmulo de deformações permanentes.

Embora tenha cumprido seu propósito por muitos anos, esse método tem uma base empírica, focada nas características climáticas e dos solos dos Estados Unidos,

desconsiderando as características peculiares do clima e solos brasileiros, além de não considerar o fenômeno de fadiga ou afundamento em trilha de rodas.

2.1.2 Método Mecanístico-Empírico (MeDiNa)

Segundo Bezerra Neto (2004), um método de dimensionamento mecanístico é aquele que através de uma teoria, consegue prever as tensões e deformações ocasionadas no pavimento, em virtude do clima que está inserido e das ações oriundas do tráfego, buscando fazer compatibilizações com as tensões resistentes dos materiais. Para Balbo (2007), os métodos mecanístico-empíricos se valem de conceitos da mecânica para desenvolver modelos teóricos acerca do comportamento estrutural do pavimento e o desempenho dos materiais é referenciado a partir do conhecimento empírico, laboratorial ou de pista.

No Brasil, através de estudos financiados pela Petrobras, realizados em conjunto por universidades e pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do DNIT, elaborou-se um novo método de dimensionamento, de caráter mecanístico-empírico, chamado de MeDiNa, cujo nome representa as siglas para o termo “Método de Dimensionamento Nacional” como também homenageia o professor Jacques de Medina, um dos pioneiros da mecânica dos pavimentos no Brasil.

O MeDiNa é um método que emprega um software que permite tanto o dimensionamento de novas rodovias, como o reforço das já existentes, possibilitando saber a espessura das camadas e o tipo de material que apresentará o melhor desempenho, além disso, também é capaz de gerar um relatório da evolução mensal de danos e simular a propagação de área trincada e acúmulo de afundamento plástico na superfície (ATR). Para sua efetiva utilização, são necessárias informações acerca das propriedades mecânicas dos materiais empregados nas camadas do pavimento, uma dessas propriedades é a rigidez, a qual é medida através do Módulo de Resiliência (MR), o mesmo é obtido através de ensaios triaxiais de cargas repetidas, e seu estudo é fundamental para um dimensionamento preciso e correta estimativa de desempenho da estrutura.

De forma sucinta, o dimensionamento de pavimentos flexíveis usando o software Medina, de acordo com Franco, Motta (2018), geralmente envolve os seguintes passos:

- Coleta de dados: é necessário reunir informações relevantes para o projeto, como tráfego esperado, características do solo e os materiais empregados.

- Entrada de dados no software: o MeDiNa possui uma interface de usuário que permite inserir os dados coletados, como tipo de tráfego, subleito, camadas do pavimento, materiais utilizados, espessuras, entre outros.
- Dimensionamento das camadas do pavimento: usando os resultados da análise de tráfego e os parâmetros inseridos, o software realiza o dimensionamento das camadas, considerando critérios de desempenho, como a capacidade de suporte e a vida útil esperada do pavimento.
- Verificação dos critérios de projeto: o programa verifica se os critérios de projeto estão sendo atendidos, como as deformações máximas permitidas, as pressões nas camadas do pavimento e a fadiga do pavimento, caso a estrutura não atenda aos critérios é possível alterar as espessuras das camadas ou incorporar novas camadas e até substituir materiais.

2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS

A mecânica de pavimentos tem por objetivo calcular as tensões e deformações solicitantes, afim de compreender os mecanismos de deterioração do pavimento, para então, dimensionar estruturas capazes de resistir aos esforços que são submetidas (MEDINA; MOTTA, 2015). A compreensão do comportamento estrutural do pavimento é capaz de nos proporcionar pavimentos mais duráveis e com viabilidade econômica e ambiental. Nos itens 2.2.1 e 2.2.2 serão apresentadas as propriedades mecânicas das misturas asfálticas avaliadas pela presente pesquisa.

2.2.1 Rigidez

No concreto asfáltico, a rigidez, é definida como uma propriedade do material que indica a potencialidade de resistir às deformações e é obtida a partir da inclinação da curva tensão-deformação. Quando submetido a pequenas deformações, o concreto asfáltico, apresenta comportamento viscoelástico linear, visto que, o revestimento asfáltico herda as propriedades viscoelásticas contidas no ligante, que é um material viscoelástico e termosuscetível. De acordo com Kim (2009), a rigidez é influenciada por diversos fatores, tais como: a taxa de deformação, temperatura, estado de tensão, as partículas dos agregados, o tipo de ligante, os vazios na mistura, a idade da mistura asfáltica, os finos no mástique, a água em forma líquida ou vapor e sua localização na mistura, etc.

Francis Haveen, em 1955, foi pioneiro nos estudos sobre comportamento resiliente de materiais empregados em pavimentação, a expressão resiliente – energia armazenada em um corpo deformado elasticamente que é transmitida de volta ao findar das tensões geradoras de deformações, foi utilizada por ele ao invés do uso da expressão elástica, já que este entendia que as deformações nos pavimentos são bem superiores às dos sólidos elásticos, como o aço e o concreto (MEDINA; MOTTA, 2005).

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

O módulo de resiliência (M_R) representa a razão entre a tensão desvio (σ_d), que é a tensão de carregamento aplicado, e a deformação resiliente (ε_r), conforme apresentado na Equação (1). A determinação do módulo de resiliência (MR) dos materiais pode ser efetuada em laboratório ou em campo. No Brasil, o método de análise da rigidez dos pavimentos mais utilizado, é o ensaio de Módulo de Resiliência (MR), onde o MR é adquirido de modo semelhante ao módulo de elasticidade, relação tensão (σ) e deformação (ε), porém, é obtido por meio de aplicação de carga repetidas.

2.2.1.1 Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência (MR), padronizado pela normativa DNIT ME 134/2018, pode ser determinado em laboratório através de ensaios triaxiais cíclicos. Assim, por meio do equipamento triaxial de cargas repetidas e com a aplicação da sequência de pares de tensões (confinante e desvio) indicadas na norma, é possível a obtenção do módulo de resiliência dos materiais, dado pela relação expressa na Equação (1), apresentada anteriormente. É importante ressaltar, que essa norma pode ser empregada para amostras de solos (materiais mais finos), de brita graduada, materiais estabilizados granulometricamente, assim como solos e materiais melhorados por pequenas quantidades de adições de produtos químicos ou outros materiais alternativos não estabilizados quimicamente. Ou seja, para materiais naturais e não para fresados que possuem ligantes asfálticos envelhecidos que podem sofrer influência da temperatura mais significativamente.

Conhecer os valores de módulo de resiliência dos materiais utilizados nos pavimentos possibilita uma análise superior quanto a previsão de comportamento da estrutura. Sabe-se, por exemplo, que quanto maior for o MR do material usado como base, mais

resistente será este material quanto às solicitações das cargas do tráfego (MARMITT; CASAGRANDE; CERATTI, 2010). Segundo Brito (2006), existem muitos estudos focados em classificar fatores que o módulo de resiliência é suscetível, bem como, com qual intensidade isso ocorre. Os principais influenciadores do comportamento de misturas asfálticas são: o tipo de agregado, graduação, teor e propriedades do ligante asfáltico, estado de tensões, densidade, etc. Dentre os elementos que afetam o módulo de resiliência de materiais granulares, a ação da tensão possui grande impacto (GUIMARÃES, 2009).

Para quantificação da deformação resiliente dos materiais, existem vários modelos que representam o comportamento do módulo de resiliência em função das tensões atuantes, uma das características desses modelos é a necessidade dos resultados do ensaio triaxial para determinação das constantes de regressão. Atualmente, com o avanço da tecnologia de softwares, modelos mais sofisticados têm surgido, com mais componentes de tensões e maiores números de constantes de regressão. No Brasil, o novo método de dimensionamento nacional, o MeDiNa, apresenta um manual de utilização com os modelos constitutivos reunidos em apenas uma expressão matemática Equação (2), esse foi o modelo de previsão utilizado neste trabalho.

$$M_r = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \cdot \theta^{k_4} \quad (2)$$

Na equação acima, k_1 , k_2 , k_3 e k_4 são constantes obtidas em laboratório; θ é a tensão octaédrica (igual à soma das tensões principais $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), σ_d é a tensão desvio, σ_3 é a tensão de confinamento e M_r é o módulo de resiliência em MPa.

2.3 FRESAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

A fresagem de pavimentos asfálticos é uma técnica essencial na reabilitação de superfícies deterioradas, visando restaurar a funcionalidade e a durabilidade dos pavimentos, a técnica consiste na remoção controlada da camada superficial do pavimento por meio do uso de fresadoras, essas são equipamentos projetados para cortar o pavimento de forma precisa e eficiente, a profundidade de fresagem pode variar dependendo das necessidades específicas do projeto e das condições do pavimento, geralmente variando de alguns milímetros a alguns centímetros.

2.3.1 Técnicas e tipos de fresagem

Existem diferentes técnicas de fresagem de pavimentos asfálticos, cada uma delas adequada para diferentes situações e requisitos específicos, quanto a temperatura de fresagem, ela pode ser realizada a quente ou a frio. De acordo com Bonfim (2010), é possível classificar a fresagem de acordo com as espessuras de corte (superficial, profunda e rasa) e quanto à rugosidade (padrão, fina e microfresagem). A Figura 1 compara os tipos de fresagem.

Figura 1 - Comparação entre os tipos de fresagem quanto à rugosidade resultante na pista



Fonte: Adaptado de Bonfim (2010).

2.3.2 Equipamentos

2.3.2.1 Máquina Fresadora

Esses equipamentos possuem diversos modelos e tamanhos, capazes de atender a todas as necessidades do mercado, para Bonfim (2010), apesar da variedade de modelos e tamanhos estes equipamentos podem ser subdivididos quanto ao seu tamanho (pequeno, médio e grande porte), conforme ilustradas na Figura 2.

Figura 2 – Máquinas Fresadoras



Fonte: Wirtgen Group (2023).

2.3.2.1 Cilindro Fresador

O cilindro fresador ou também chamado de tambor fresador, é um tambor rígido construído em aço especial, no qual os dentes de corte são fixados, nele é aplicado uma alta rotação, quando colocado para cortar, iniciando o desbaste do pavimento.

Geralmente possuem os dentes de corte dispostos em forma de “V” que conduz o material fresado para o centro do tambor, facilitando seu lançamento na correia transportadora (BONFIM, 2010). Os dentes de corte são ferramentas de corte fixadas no cilindro fresador, constituídas por corpo forjado em aço e pontas de material mais duro, que agem diretamente no pavimento, para fornecem uma superfície de textura rugosa, plana e sem desníveis, as peças onde os dentes são fixados possuem posições e ângulos de ataque definidos (BONFIM, 2010). Os tipos de cilindros são apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Cilindros para os 3 tipos de fresagem



Fonte: Gewehr (2021).

2.4 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Fatores como, as ações do tráfego, mau dimensionamento do pavimento, intempéries ou até mesmo o envelhecimento natural das camadas de revestimento, acabam desencadeando processos de degradação dos materiais constituintes das diversas camadas da estrutura. Assim, quando a capacidade de suporte do pavimento é comprometida devido a danos causados por deformações permanentes e fadiga, torna-se necessário realizar intervenção e manutenção para restauração da estrutura. Neste cenário, remove-se o revestimento danificado, por meio do processo de corte, caracterizado como fresagem (BONFIM, 2010). O resíduo do processo de fresagem, que possui grande potencial de reaproveitamento na reciclagem de pavimentos, é denominado *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*, esse material poderá ser aproveitado tanto

na produção de novos revestimentos, como para incorporação em camadas de base ou sub-base.

Existem várias técnicas de reciclagem utilizando o RAP, Bonfim (2010), por exemplo, apresenta uma classificação mais geral, quanto aos materiais, locais de processamento, profundidade de corte, tipos de misturas e adições, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de Reciclagem

Quanto à geometria original	Sem modificação	Quando se mantêm as cotas do greide
	Com modificação	
Quanto ao local de processamento	Em usina	Fixa ou móvel, a quente ou a frio
	“in situ”	
	Mista	"in situ" da reciclagem base e aplicação de reciclagem a quente, processada em usina com material fresado
Quanto à fresagem do material	A frio	Realizada na temperatura ambiente
	A quente	Realizada com pré-aquecimento do pavimento
Quanto à profundidade do corte	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, base e até sub-base
Quanto à mistura reciclada	Mistura a frio	PMF
	Mistura a quente	CBUQ, PMQ
Quanto ao uso da mistura	Como base reciclada	
	Como camada de ligação	
	Como revestimento	
Quanto aos materiais adicionados	Agregados	Correção granulométrica
	Cimento Portland e cal	Aumento da capacidade estrutural
	Emulsão especial, CAP, Polímeros	Rejuvenescimento
	Mistura asfáltica	Adição de material fresado

Fonte: Bonfim (2010, p. 104).

A associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (The Asphalt Recycling and Reclaiming Association) (ARRA, 2001), também definiu categorias principais de diferentes métodos de reciclagem, dividindo-as em cinco grupos:

1. **Cold planing ou milling** (CP): fresagem e recomposição do revestimento;
2. **Hot recycling** (HR): reciclagem a quente, em usina;
3. **Hot in-place recycling** (HIR): reciclagem a quente, *in situ*;
4. **Full depth reclamation** (FDR): reciclagem profunda;

5. **Cold recycling (CR):** reciclagem a frio.

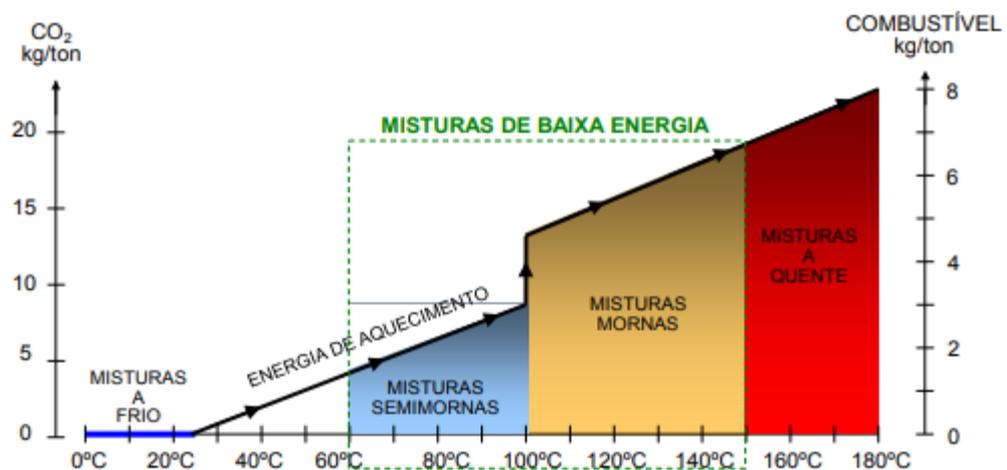
- a. *Cold central plant recycling (CCPR):* reciclagem a frio, em usina;
- b. *Cold in-place recycling (CIR):* reciclagem a frio, *in situ*.

Dentro deste contexto, a reciclagem a frio, que será tema de estudo nesta pesquisa, pode ser classificada conforme descrito a seguir (WIRTGEN, 2012; ARRA, 2015):

- Sem estabilização;
- Estabilizada granulometricamente;
- Estabilizada com aglomerantes hidráulicos;
 - o Cal hidratada, cimento Portland, cinzas volantes.
- Estabilizada com agentes de reciclagem asfálticos;
 - o Emulsão asfáltica;
 - o Espuma de asfalto.
- Combinação de duas ou mais técnicas.

O emprego da reciclagem *in situ* deve ser o método comumente preferencial, dentro das condições possíveis, em virtude das vantagens econômicas e ambientais (WIRTEGEN, 2012). De acordo com classificações feitas por Motta, Bernucci e Faria (2012) apresentadas na Figura 4, é possível perceber que com a elevação da temperatura de trabalho das misturas e conseqüentemente o crescimento do consumo de energia, a emissão de CO₂ também aumenta.

Figura 4 - Esquema de classificação das misturas asfálticas



Fonte: Motta, Bernucci e Faria (p. 143, 2012).

A reciclagem de pavimentos não é uma técnica nova, de acordo com Motta, Pinto e Guarçoni (2002) há informações de que nos Estados Unidos, no ano de 1915, ocorreu a primeira execução de reciclagem com Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ). No Brasil, o processo de reciclagem de pavimentos teve início na década de 80, com destaque para a primeira obra de reciclagem na rodovia Anhanguera, que liga São Paulo a Campinas (COSTA; PINTO, 2010). Já na década de 90, também há relatos de reciclagem a frio em trechos experimentais na rodovia do Açúcar, pelo Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (PARANHOS; TUCHUMANTEL, 1992). Destaca-se também trechos experimentais mais recentes, com misturas recicladas a frio, que foram executados no estado de São Paulo como o da Rodovia Ayrton Senna (SP-070), realizado em 2013 (GUATIMOSIM, 2015) e da Rodovia Presidente Castello Branco (SP-280), nos anos de 2017 e 2018 (UNGER FILHO, 2019).

A utilização do RAP surge como uma alternativa sustentável e viável tanto do ponto de vista ambiental como econômico, o aumento da aplicação do método de reciclagem de pavimentos proporciona o aproveitamento de agregados e ligantes dos pavimentos degradados, além da conservação da geometria e espessura do pavimento já existente, proporcionando à sociedade, rodovias mais seguras e eficientes (DAVID, 2006).

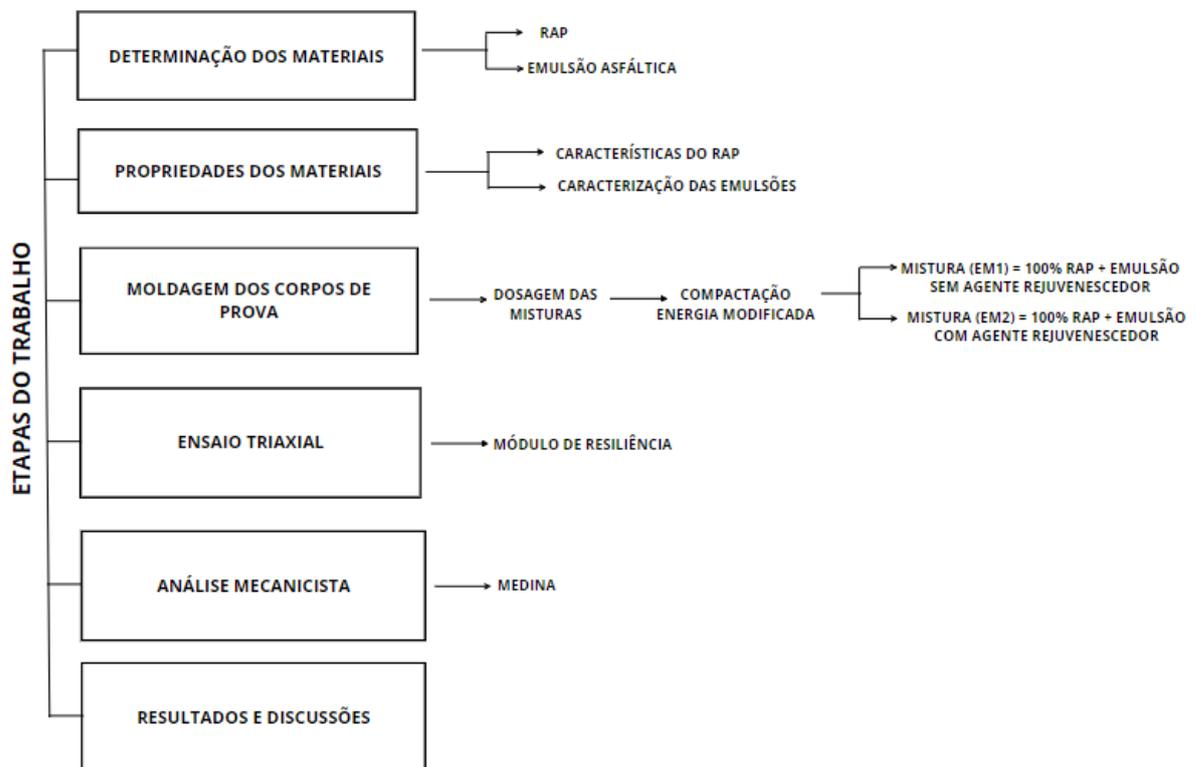
3 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

Este capítulo destina-se à caracterização dos materiais, apresentação dos métodos utilizados e dos ensaios adotados neste trabalho.

O trabalho foi realizado através das etapas elencadas a seguir e representadas na Figura 5:

- a) Determinação dos materiais;
- b) Propriedades dos materiais;
- c) Moldagens dos corpos de prova;
- d) Ensaio triaxial;
- e) Análise Mecanicista;
- f) Resultados e discussões.

Figura 5 – Etapas do trabalho



Fonte: Autora (2023).

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho que originaram as misturas estudadas são: material fresado proveniente de obra restauração de rodovias, dois tipos de emulsão asfáltica e água.

3.1.1 *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*

O material fresado utilizado neste trabalho é proveniente de processos de manutenção e conservação rodoviárias no trecho da rodovia BR-290/RS. O “RAP-BR290”, possui na sua composição ligante AMP 60/85 e agregado do tipo basáltico, o material encontra-se armazenado em sacos plásticos e coberto por lonas nas dependências do laboratório de pavimentação asfáltica da UFSM, o material já havia sido previamente seco, homogeneizado e quarteado em frações menores.

Segundo Santos (2021), para esse material fresado, a “Faixa C – DNIT 031/2006”, para misturas betuminosas usinadas a quente foi a que atingiu melhor aproximação com a sua curva granulométrica, no entanto, percebe-se que a quantidade de finos não foi suficiente para atender aos limites da faixa, o que é considerado comum no caso de materiais fresados, pois os finos são incorporados pelo ligante asfáltico. O equipamento utilizado na fresagem, bem como detalhes do RAP originário da fresagem estão ilustrados na Figura 6.

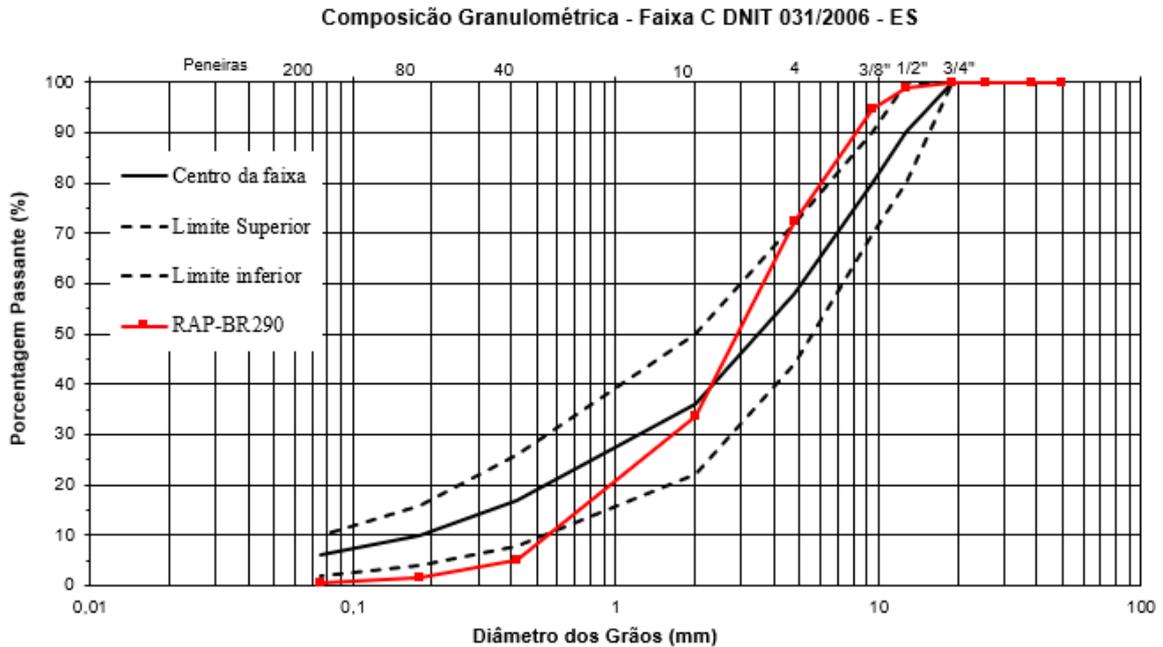
Figura 6 – Equipamento utilizado na fresagem e tambor de fresagem. Detalhe do RAP originário da fresagem do trecho BR-290/RS



Fonte: (CORREA, 2020).

Na Figura 7 e Tabela 2 podemos observar a curva granulométrica do material “RAP-BR290” obtida da média de três amostras na pesquisa desenvolvida por Santos (2021).

Figura 7 - Curva granulométrica do material “RAP-BR290” em relação à Faixa C DNIT 031/2006



Fonte: (SANTOS, 2021).

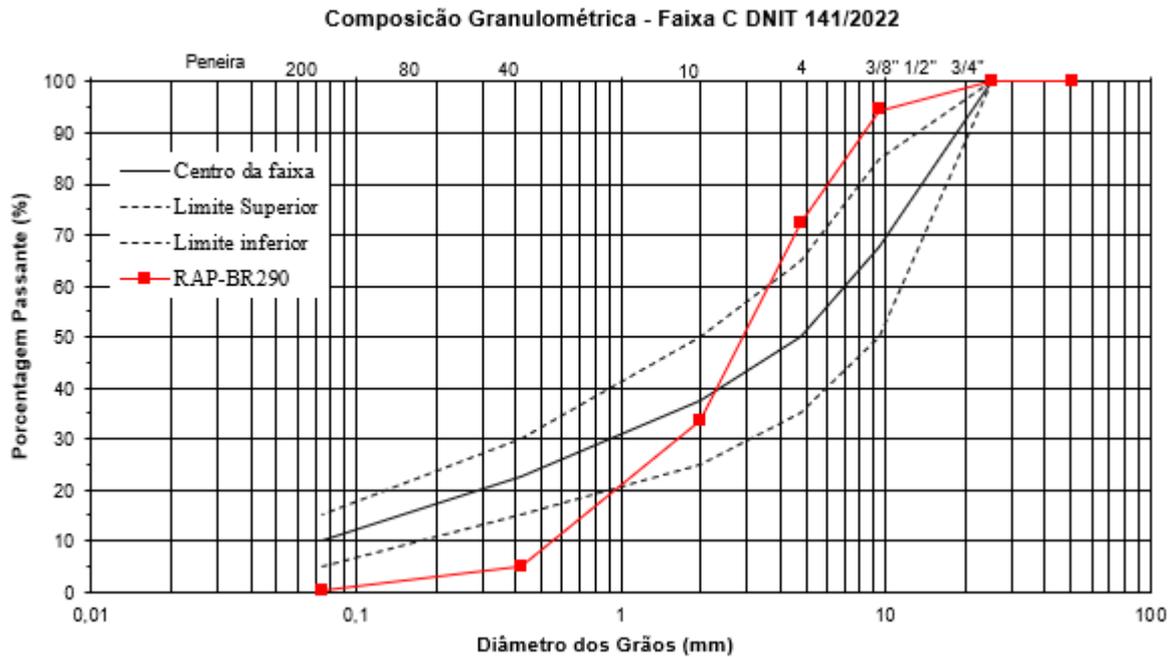
Tabela 2 – Granulometria do material fresado (RAP-BR290) e faixa granulométrica de referência

Peneira	mm	FAIXA C DNIT031/2006-ES			RAP-BR290
		Lim. Inf.	Lim. Sup.	Centro	
2"	50	100	100	100	100,00
1 1/2"	38,1	100	100	100	100,00
1"	25,4	100	100	100	100,00
3/4"	19,1	100	100	100	100,00
1/2"	12,7	80	100	90	98,68
3/8"	9,5	70	90	80	94,52
nº 4	4,8	44	72	58	72,38
nº 10	2,0	22	50	36	33,69
nº 40	0,42	8	26	17	4,93
nº 80	0,18	4	16	10	1,48
nº 200	0,075	2	10	6	0,43

Fonte: Adaptado de Santos (2021).

Ainda, foi feita uma análise gráfica desse material em relação aos limites da Faixa C DNIT141/2022, norma de especificação para camadas de base. O gráfico das curvas está apresentado na Figura 8, bem como, na Tabela 3 estão as informações sobre a faixa granulométrica de referência de acordo com a norma do DNIT.

Figura 8 - Curva granulométrica do material "RAP-BR290" em relação a Faixa C DNIT141/2022



Fonte: Autora (2023).

Tabela 3 - Faixa granulométrica de referência

Peneira	mm	FAIXA C DNIT141/2010-ES		
		Lim.Inf.	Lim.Sup.	Centro
2"	50	-	-	100
1 1/2"	38,1	-	-	100
1"	25,4	100	100	100
3/4"	19,1	-	-	-
1/2"	12,7	-	-	-
3/8"	9,5	50	85	67,5
n° 4	4,8	35	65	50
n° 10	2,0	25	50	37,5
n° 40	0,42	15	30	22,5
n° 80	0,18	-	-	-
n° 200	0,075	5	15	10

Fonte: DNIT 141/2022 – ES (2022).

Por fim, em estudos desenvolvidos por Almeida (2022), foi obtido o teor de ligante asfáltico existente no material fresado por meio de ensaios de extração por centrifugação com o Rotarex elétrico e forno de ignição, os resultados estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Teor de ligante no fresado

Fresado	Método	AM-1	AM-2	AM-3	Média
RAP – BR290	Forno	5,94	-	-	5,94
	Rotarex	5,76	5,78	5,74	5,76

Fonte: Adaptado de Almeida (2022).

3.1.2 Emulsões Asfálticas

Neste trabalho foram utilizadas emulsões asfálticas do tipo catiônica de ruptura lenta. Para a mistura 1 (EM1), foi utilizada a emulsão sem agente rejuvenescedor, já para a mistura 2 (EM2) utilizou-se a emulsão com agente rejuvenescedor. As mesmas foram fornecidas pela empresa CBB asfaltos, especializada na produção de materiais asfálticos, a qual realizou a caracterização dos materiais apresentada através do seu certificado de qualidade, que continha os ensaios apresentados nas tabelas subsequentes. O uso de emulsões a frio são uma opção atrativa por serem de fácil manuseio quando comparadas a ligantes a quente e não exigirem o consumo de energia, em forma de calor, para sua utilização em misturas asfálticas.

Nas tabelas a seguir são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das emulsões utilizadas neste trabalho.

Tabela 5 – Ensaios de caracterização da emulsão asfáltica de ruptura lenta sem agente rejuvenescedor (EM1)

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES	
				MÍN	MAX
Resíduos asfálticos	%(m/m)	NBR14376	63,6	62,0	-
Viscosidade Saybolt Furol, 25° C	ssf	NBR14491	20	20	200
Peneiramento, retido na peneira 0,84mm	%(m/m)	NBR14393	0,07	-	0,1
Sedimentação, 5 dias, diferença do resíduo entre topo e fundo	%(m/m)	NBR6570	-	-	5
Carga da partícula	-	NBR6567	Positiva	Positiva	
Desemulsibilidade	%(m/m)	NBR6569	2,24	-	50

Fonte: Adaptado de CBB Asfaltos (2021).

Tabela 6 - Ensaio de caracterização do ligante asfáltico obtido por evaporação (NBR 14896)

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES	
				MÍN	MAX
Teor de betume	%	NBR14855	97,2	97	-
Penetração, 100g, 5s, 25°C	0,1 mm	NBR 6576	55	40	150
Ductibilidade 25°C	cm	NBR 6293	91,7	40	-

Fonte: Adaptado de CBB Asfaltos (2021).

Tabela 7 – Ensaio de caracterização da emulsão asfáltica de ruptura lenta com agente rejuvenescedor (EM2)

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES	
				MÍN	MAX
Resíduos asfálticos	%(m/m)	NBR14376	63,8	63,0	-
Viscosidade Saybolt Furol, 25° C	ssf	NBR14491	27	-	200
Peneiramento, retido na peneira 0,84mm	%(m/m)	NBR14393	0	-	0,1
Sedimentação, 5 dias, diferença do resíduo entre topo e fundo	%(m/m)	NBR6570	0,92	-	5
Carga da partícula	-	NBR6567	Positiva	Positiva	
Desemulsibilidade	%(m/m)	NBR6569	1,21	-	50

Fonte: Adaptado de CBB Asfaltos (2021).

As emulsões foram armazenadas em local seguro e livre de intempéries, protegida dentro dos galões plásticos lacrados, como chegaram da fábrica, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Armazenamento das emulsões asfálticas utilizadas



Fonte: Autora (2023).

3.1.3 Água

A água utilizada na moldagem atende a NBR 11803 (ABNT, 2013b), é potável e isenta de matéria orgânica, à 25°C, temperatura comumente utilizada em ensaios laboratoriais.

3.2 MÉTODOS

Os procedimentos laboratoriais utilizados neste trabalho serão apresentados a seguir, serão descritas as etapas necessárias para a realização da moldagem e cura dos corpos de provas, como também ensaios mecânicos que as misturas foram submetidas.

3.2.1 Moldagem dos corpos de prova

Inicialmente, foi calculada a massa necessária para cada amostra, definindo o teor de umidade ótima para as duas misturas, para isso foi usada como parâmetro a norma da AASHTO PP 86-20, a qual apresenta que os valores de água adicionada não devem ser superiores a 3%, juntamente com análises da curva de compactação da mistura M5 -100% RAP – BR da pesquisa de Santos (2021). Dessa forma fixou-se o teor de água em 3% em relação ao peso seco dos materiais. Foram usadas as emulsões do tipo catiônica estabilizante de bases granulares e do tipo com agente rejuvenescedor, já caracterizadas anteriormente, com teor de incorporação em torno de 3,5% ($\pm 0,5$). Para essa definição, baseou-se em estudos disponíveis na pesquisa de Brondani (2023) e em orientações da norma da AASHTO (2020).

O procedimento de moldagem foi realizado através da compactação por energia modificada, utilizando um cilindro tripartido (Figura 10 letra b), seguindo as condições de compactação de corpos de prova para ensaio de módulo de resiliência DNIT 134/2018-ME, conforme Tabela 8. Foram moldadas 3 amostras para cada tipo de emulsão, ambas com 100% “RAP-BR290”.

Figura 10 – Mistura e equipamentos utilizados na moldagem



a) Mistura

b) Cilindro tripartido

c) Compactador

Fonte: Autora (2023).

Tabela 8 – Procedimento de compactação das amostras

Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Energia (kgf.cm/cm ³)		Nº de camadas	Altura de queda (cm)	Peso do Soquete (kgf)	Nº de golpes por camada
10	20	1570,8	Modificada	27,3	10	30,5	2,5	56
						45,7	4,53	21
						30,5	4,53	31
						45,7	2,5	38

Fonte: Norma DNIT 134/2018-ME (2018).

Após as moldagens, os corpos de prova (CPS) foram retirados, cuidadosamente, do cilindro tripartido e em seguida foram pesados e colocados na estufa a 60°C por 48h consecutivas, pois, a cura em temperatura ambiente não obtém a evaporação da água da emulsão de maneira satisfatória. O processo de cura adotado neste trabalho, foi baseado na pesquisa de Tanski (2016) e literatura da AASHTO (2020).

Figura 11 – Amostras prontas – (a) Pesagem do CP (b) CPs moldados curando em estufa à 60°C (c) CPs curados após 48h



Fonte: Autora (2023).

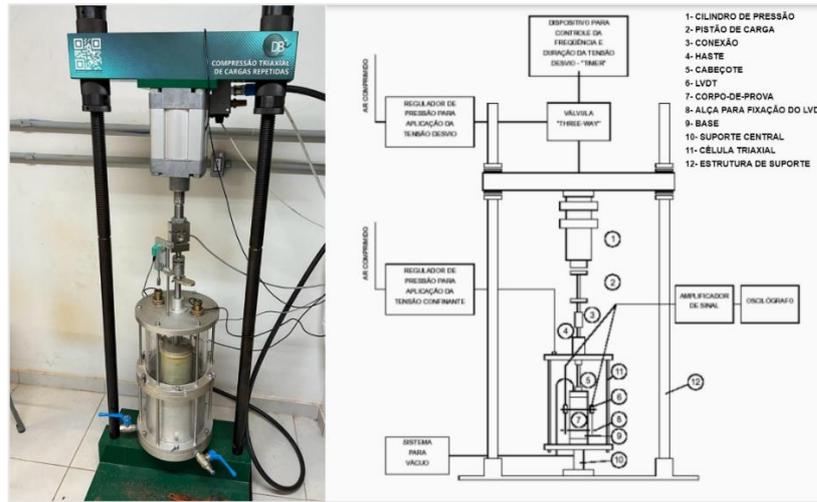
Por fim, após o procedimento de cura, os corpos de prova foram pesados, medidos e, então, submetidos ao ensaio triaxial de cargas repetidas.

3.2.2 Ensaio triaxial de cargas repetidas

Neste item, será exposto os procedimentos executivos do ensaio triaxial de cargas repetidas, efetuado com o objetivo de adquirir os parâmetros resilientes das misturas estudadas.

Para a realização deste ensaio, foi utilizado o equipamento triaxial de cargas repetidas (Figura 12) que se encontra no laboratório de pavimentação da UFSM, a normativa seguida foi DNIT 134/2018.

Figura 12 – Equipamento triaxial de cargas repetidas e esquema de funcionamento



Fonte: Autora (2023).

Os ensaios triaxiais de cargas repetidas têm como principal objetivo reproduzir de forma aproximada, em laboratório, as condições de carregamento impostas aos materiais quando submetidos às cargas do tráfego. O princípio de funcionamento do ensaio se baseia em uma força vertical aplicada que atua sempre num mesmo sentido de compressão, devido à uma tensão principal (σ_d) que varia de zero a um máximo e depois diminui até se anular, ou atingir um patamar inferior, seguida de um tempo de repouso. Além disso, é possível inserir uma tensão de confinamento (σ_3) na câmara triaxial, onde a pressão é gerada através de um sistema de ar comprimido. A velocidade e o volume de tráfego são simulados, respectivamente, pelo tempo de pulso e frequência da carga aplicada (MEDINA, 1997).

O ensaio divide-se em duas fases: a fase de condicionamento e a de ensaio de fato. O condicionamento é responsável por reduzir a influências das grandes deformações plásticas. Os valores de MR são obtidos na segunda fase do ensaio, onde para cada par de tensões σ_d (tensão desvio) e σ_3 (tensão confinante) aplicado é realizada a medição da deformação resiliente resultante.

Conforme são aplicadas as tensões, ocorrem deformações de natureza elástica (ϵ_r) e plástica ou permanente (ϵ_p), as quais são medidas através de transdutores mecânico-eletromagnéticos, chamados *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT), estes transformam as deformações em potencial elétrico que serão registrados no software SEEPAV 14200 (Sistema de Ensaio Especiais de Pavimentação) que realiza leituras de até 5mm. Os módulos são calculados pela relação entre as tensões e deformação resiliente (ϵ_r).

3.2.2.1 Módulo de Resiliência

A obtenção do módulo de resiliência das misturas foi alcançada a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas, para esse ensaio foram reproduzidos três CPs por mistura. Os procedimentos de moldagem e posicionamento do corpo de prova no equipamento ocorreram conforme apresentado na norma DNIT 134/2018-ME.

No decorrer da fase de condicionamento, o corpo de prova foi submetido a três pares de tensões e 500 ciclos de carregamentos por par, conforme Tabela 9. Posteriormente a fase de condicionamento, foram aplicados uma sequência de dezoito pares de tensões confinantes (σ_3) e tensão desvio (σ_d), indicadas na Tabela 10. A frequência de aplicação das cargas repetidas é de 1 Hz, com 0,1 s de aplicação de carga e 0,9 segundo de repouso.

Tabela 9 – Sequência de tensões para fase de condicionamento

Tensão Confinante σ_3 (MPa)	Tensão Desvio σ_d (MPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
0,070	0,070	2
0,070	0,210	4
0,105	0,315	4

Fonte: DNIT134/2018 - ME

Tabela 10 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência
(continua)

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_1/σ_3
0,020	0,020	2
	0,040	3
	0,060	4
0,035	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4

Tabela 10 - Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência (conclusão)

0,105	0,105	2
	0,210	3
	0,315	4
0,140	0,140	2
	0,280	3
	0,420	4

Fonte: DNIT134/2018 – ME

3.2.3 Análise Mecanicista

Ao fim das etapas laboratoriais e em posse das análises dos materiais, foi realizada uma avaliação mecanicista usando o software MeDiNa, com o intuito de fazer um comparativo do comportamento das misturas recicladas a frio, estudadas neste trabalho, com o material M5-100% RAP-BR estudado na pesquisa de Santos (2021), todos como camada granular de pavimento asfáltico. Essa avaliação busca encontrar em quais situações os materiais avaliados nesta pesquisa terão seu melhor comportamento e em quais seu uso favorável.

Para comparar o desempenho mecanicista, como camada granular, dos materiais citados anteriormente, avaliou-se o desempenho dos materiais frente a quatro situações (B, C, D e E) de tráfego e tipos de revestimentos distintos, também definidos por Santos (2021) e apresentados na Tabela 11. Os materiais empregados como revestimento são do próprio banco de dados do MeDiNa, versão 1.1.5.0.

Além disso, foram utilizadas as estruturas de pavimentos dimensionadas, pelo método MeDiNa, na pesquisa de Santos (2021), onde o material de subleito empregado foi o “Solo Horizonte B”, o qual representa um material real que é encontrado no estado do Rio Grande do Sul, já analisado previamente por Pascoal (2020), Tabela 12.

Tabela 11 – Situações de tráfego e tipos de revestimentos

B	C	D	E
N= 5,0x10 ⁶	N= 1,0x10 ⁷	N=2,5x10 ⁷	N=5x10 ⁷
Revestimento: CA (Classe 1)	Revestimento: CA (Classe 3)	Revestimento: CA (Classe 4)	Revestimento: CA (Classe 4)
Subleito: Solo Horizonte B (PASCOAL,2020)	Subleito: Solo Horizonte B (PASCOAL,2020)	Subleito: Solo Horizonte B (PASCOAL,2020)	Subleito: Solo Horizonte B (PASCOAL,2020)

Fonte: Santos (2021)

Tabela 12 – Dados do “Solo Horizonte B” usados para análise no MeDiNa

Material	Propriedades	Modelo
Solo Horizonte B PASCOAL (2020)	Descrição do Material = Argilas laterítica argilosa da Jazida de Cruz Alta RS – 342 Coef. De Poisson: 0,45 ISC=16,6%;Exp.=0,26% (Energia Normal) Grupo MCT = LG' MCT – Coeficiente $c' = 2,35$ MCT – Índice $e' = 0,69$ Massa específica (g/cm ³)= 1,625 Umidade Ótima (%)= 25,6 Energia Compactação= Intermediária Norma ou Especificação= DNIT ES 137 Fonte: Pascoal (2020)	Resiliente Não Linear MR = 219 Mpa (1º mês) K1 = 739,20 K2 = 0,340 K3 = 0,004 K4 = 0,000 Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $\epsilon_p = \psi_1 \cdot (s^3 \psi_2) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou ψ_1): 0,017 Coeficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): 0,699 Coeficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): 0,517 Coeficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): 0,10

Fonte: Santos (2021).

Em cada situação, foram adotados materiais distintos como camada de base, o material M5-100% RAP-BR de Santos (2021), que possui somente material fresado, RAP-BR290, e os dois materiais, estudados na presente pesquisa, que possuem a mesma composição do material fresado, porém um com adição de emulsão asfáltica catiônica estabilizante e o outro com adição de emulsão com agente rejuvenescedor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo do trabalho serão apresentados e discutidos os resultados das etapas de trabalho descritas na metodologia.

4.1 COMPORTAMENTO RESILIENTE DAS MISTURAS

A fim de obter os módulos de resiliência das misturas analisadas, foi executado o ensaio triaxial de cargas repetidas, conforme a norma DNIT 134/2018 – ME. As amostras avaliadas pelo ensaio, estão descritas na Tabela 13. Nas tabelas 14 e 15 estão expressos os valores resultantes de módulos de resiliência para os pares de tensões, bem como o MR médio de cada amostra.

Tabela 13 – Amostras válidas para o ensaio triaxial

Mistura	Amostras	D (cm)	H (cm)
EM1	CP-01	9,97	19,3
	CP-02	9,99	19
	CP-03	10	18,9
EM2	CP-01	9,99	18,8
	CP-02	10	18,9
	CP-03	9,98	19

Legenda: CP: Corpo de prova; D: Diâmetro; H: Altura

Fonte: Autora (2023).

Tabela 14 – Valores de módulo de resiliência - EM1
(continua)

σ_3	σ_d	MR-01	MR-02	MR-03
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
0,021	0,021	134,579	113,257	159,942
0,021	0,042	150,189	117,038	146,047
0,021	0,063	216,31	152,157	163,427
0,035	0,035	189,932	152,37	215,468
0,035	0,07	317,957	219,248	241,748
0,035	0,105	331,778	304,229	371,591
0,053	0,053	307,126	315,666	404,12
0,053	0,105	551,566	433,929	403,581
0,053	0,158	453,851	350,796	464,198
0,07	0,07	520,562	424,292	575,443
0,07	0,14	729,52	453,411	625,719
0,07	0,21	611,171	568,963	651,41
0,105	0,105	798,784	744,736	824,781
0,105	0,21	929,012	798,795	828,437

Tabela 14 - Valores de módulo de resiliência - EM1
(conclusão)

0,105	0,315	1035,446	978,662	969,53
0,14	0,14	1045,619	1042,953	1029,238
0,14	0,28	1163,575	1143,373	1071,159
0,14	0,42	1282,587	1192,459	1132,188
MR Médio (MPa)		598	528	571
Média total (MPa)			566	

Fonte: Autora (2023).

Tabela 15 - Valores de módulo de resiliência – EM2

σ_3	σ_d	MR-01	MR-02	MR-03
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
0,021	0,021	177,188	184,049	199,059
0,021	0,042	224,412	191,025	201,246
0,021	0,063	264,428	253,488	235,366
0,035	0,035	256,226	268,515	301,383
0,035	0,07	269,717	304,416	284,901
0,035	0,105	337,18	464,179	413,028
0,053	0,053	488,913	455,219	498,347
0,053	0,105	487,041	430,123	418,133
0,053	0,158	437,991	565,507	464,69
0,07	0,07	574,974	517,109	657,522
0,07	0,14	513,118	673,314	531,054
0,07	0,21	651,299	581,565	586,228
0,105	0,105	730,523	779,992	780,402
0,105	0,21	825,786	845,257	712,349
0,105	0,315	904,88	880,482	828,993
0,14	0,14	897,721	955,679	912,636
0,14	0,28	1021,377	1066,627	871,384
0,14	0,42	1028,673	1161,113	1029,833
MR Médio (MPa)		561	588	551
Média total (MPa)			567	

Fonte: Autora (2023).

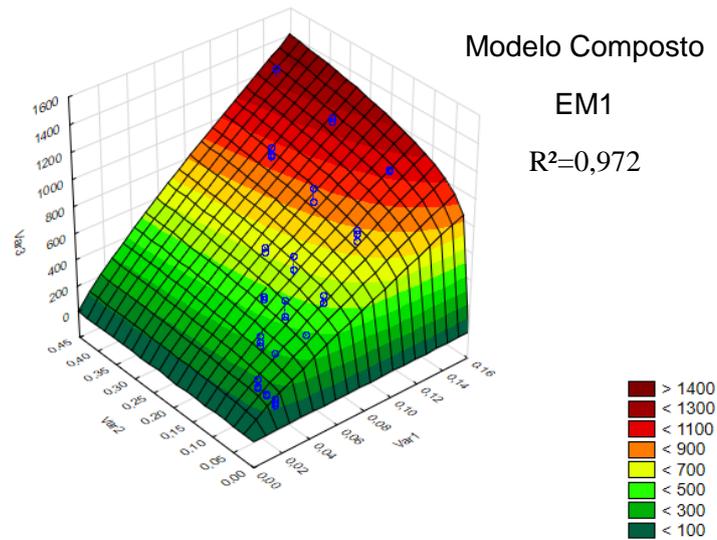
Com os valores dos módulos gerados, foi possível fazer uma análise não linear simultânea das amostras, usando o programa “Statística”, e então obter os parâmetros de regressão utilizados para as análises no MeDiNa. O modelo utilizado para obter os parâmetros foi o Modelo Composto, o qual leva em consideração a influência conjunta das tensões confinante e desvio, o mesmo compõe a base de cálculos do software do novo método de dimensionamento nacional. Os resultados obtidos para os parâmetros estão na Tabela 16, bem como a representação gráfica do modelo que apresenta o comportamento da mistura, considerando uma análise concomitante das amostras de cada mistura, nas Figuras 13 e 14.

Tabela 16 - Modelo de previsão de módulo de resiliência

MODELO COMPOSTO	MISTURA	K1	K2	K3	R ²
$MR = K_1 \times \sigma_3^{K_2} \times \sigma_d^{K_3}$	EM1	7716,409	0,852	0,175	0,972
	EM2	4458,551	0,678	0,116	0,965

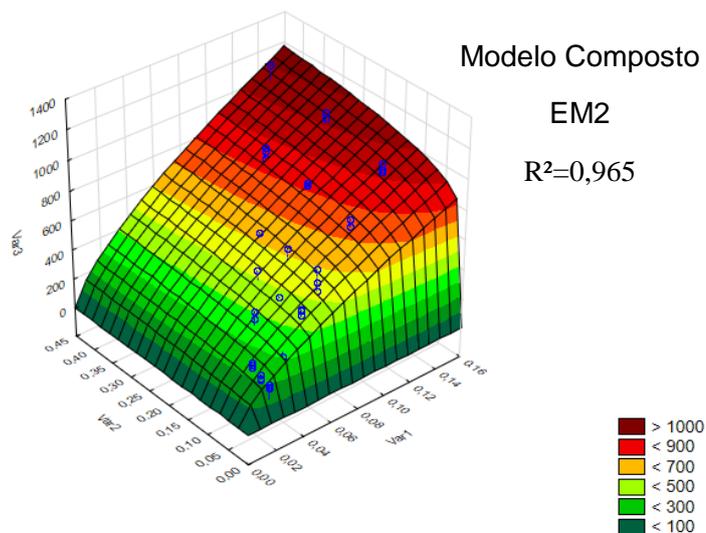
Fonte: Autora (2023).

Figura 13 – Representação Gráfica do modelo composto para mistura EM1



Fonte: Autora (2023).

Figura 14 - Representação gráfica do modelo composto para mistura EM2



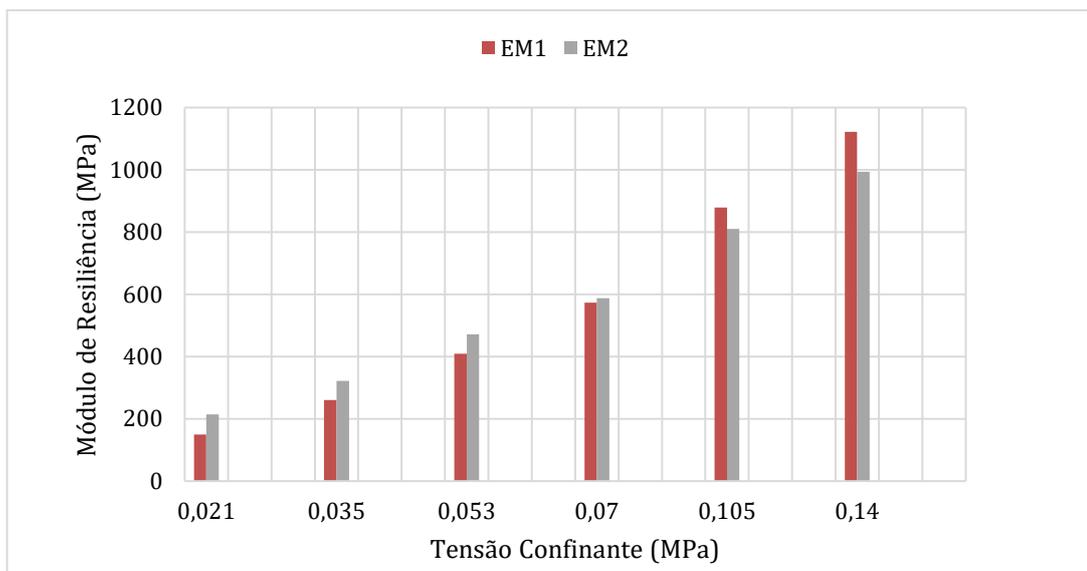
Fonte: Autora (2023).

4.1.1 Análise comparativa entre as misturas: influência do tipo de emulsão nos valores de MR

Mediante a análise percebe-se que não houve aumento considerável nos valores de MR para diferentes tipos de emulsão, conforme demonstra a Figura 15, visto que os valores médios de MR, apresentados anteriormente, deram bem próximos.

Os valores de módulos de resiliência analisados no trabalho são semelhantes aos obtidos na literatura. De acordo com Balbo (2007), valores típicos para bases granulares estão entre 200 e 350 MPa, ambas as misturas apresentaram resultados superiores, ao mínimo de 200 MPa, estimados pelo autor. Percebe-se também um aumento da rigidez do material à medida que a tensão confinante aumenta, iniciando com módulos de resiliência da ordem de 100 MPa, e alcançando valores superiores a 1000 Mpa.

Figura 15 – Valores médios de módulo de resiliência das misturas



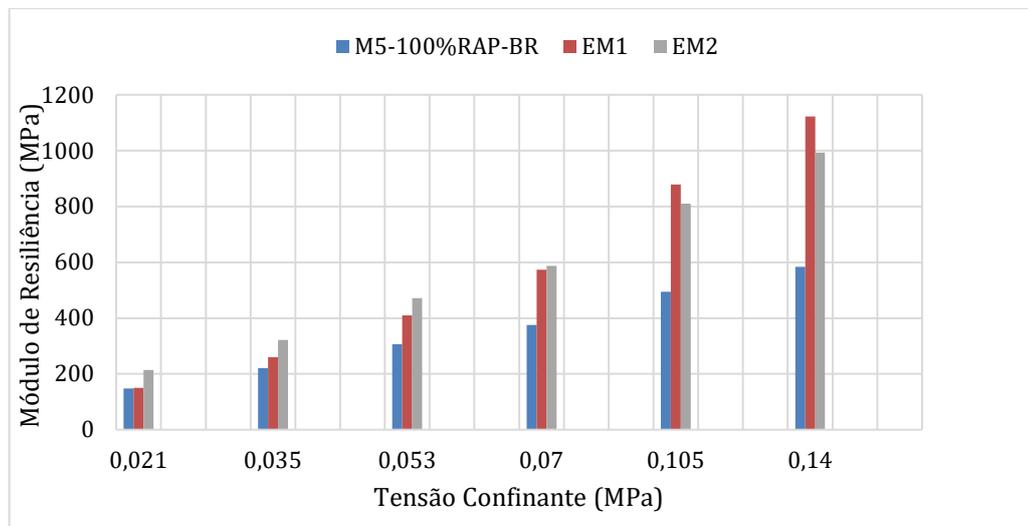
Fonte: Autora (2023).

4.1.2 Análise comparativa das amostras com o material M5-100%RAP-BR: Influência do uso de emulsão nos valores de MR das misturas

Após obter os valores de MR, uma análise comparativa foi com os valores dos módulos das duas misturas desta pesquisa, EM1 e EM2, com os valores do material M5-100%RAP-BR de Santos (2021), o qual possui apenas material fresado, sem o uso de emulsão.

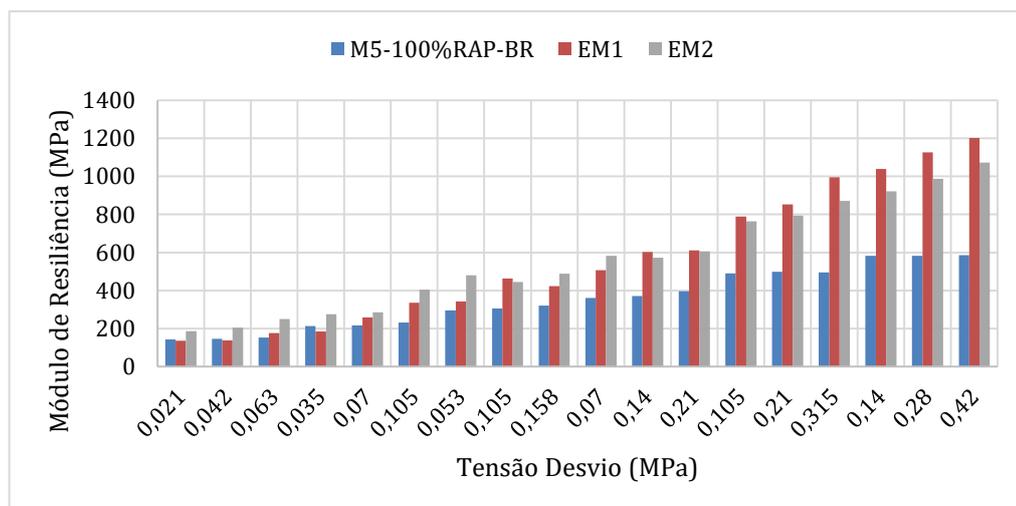
A partir disso, foi possível observar módulos de resiliência maiores nas misturas com emulsão, essa diferença é significativa conforme o aumento da tensão confinante (σ_3). O mesmo foi observado em relação a tensão desvio (σ_d), para os pares de tensões finais o aumento do MR nas misturas com emulsão é significativamente superior aos valores da mistura M5-100%RAP-BR que não possui emulsão na sua composição. As análises comparativas, para cada tipo de tensão, estão apresentadas na Figura 16 e Figura 17.

Figura 16 – Gráfico comparativo de valores médios de módulo de resiliência versus tensão confinante



Fonte: Autora (2023).

Figura 17 – Gráfico comparativo de valores médios de módulo de resiliência versus tensão desvio



Fonte: Autora (2023).

4.2 ANÁLISE MECANICISTA

4.2.1 Propagação da área trincada

Com a finalidade de demonstrar a aplicação das misturas estudadas em camada de base de pavimento, foram realizadas simulações por meio do software MeDiNa. Os MRs desses materiais foram aplicados como dados de entrada no software, com intuito de obter a porcentagem de área trincada da estrutura. O limite de 30% de área trincada é estabelecido pelo MeDiNa, valores acima disso caracterizam a ruptura do pavimento.

Primeiramente, foram feitas análises comparativas frente a quatro situações de tráfego, modificando os materiais correspondente à camada de base e mantendo fixo os valores de espessuras para cada situação, conforme Tabela 17. Para isso, utilizou-se a estrutura de pavimento dimensionada por Santos (2021). Nas análises foram comparadas as duas misturas estudadas neste trabalho com o material M5-100%RAP-BR de Santos (2021).

Os resultados do desempenho dos materiais mostram por meio dos gráficos apresentados na Figura 18, que as misturas com adição de emulsão asfáltica, principalmente com agente rejuvenescedor, demonstraram maior resistência a fadiga, consequentemente atingindo uma vida útil maior. Este comportamento fica mais visível da metade pro fim da vida do tempo de projeto e útil dos pavimentos.

Tabela 17 – Dimensões das camadas do pavimento para cada situação
(continua)

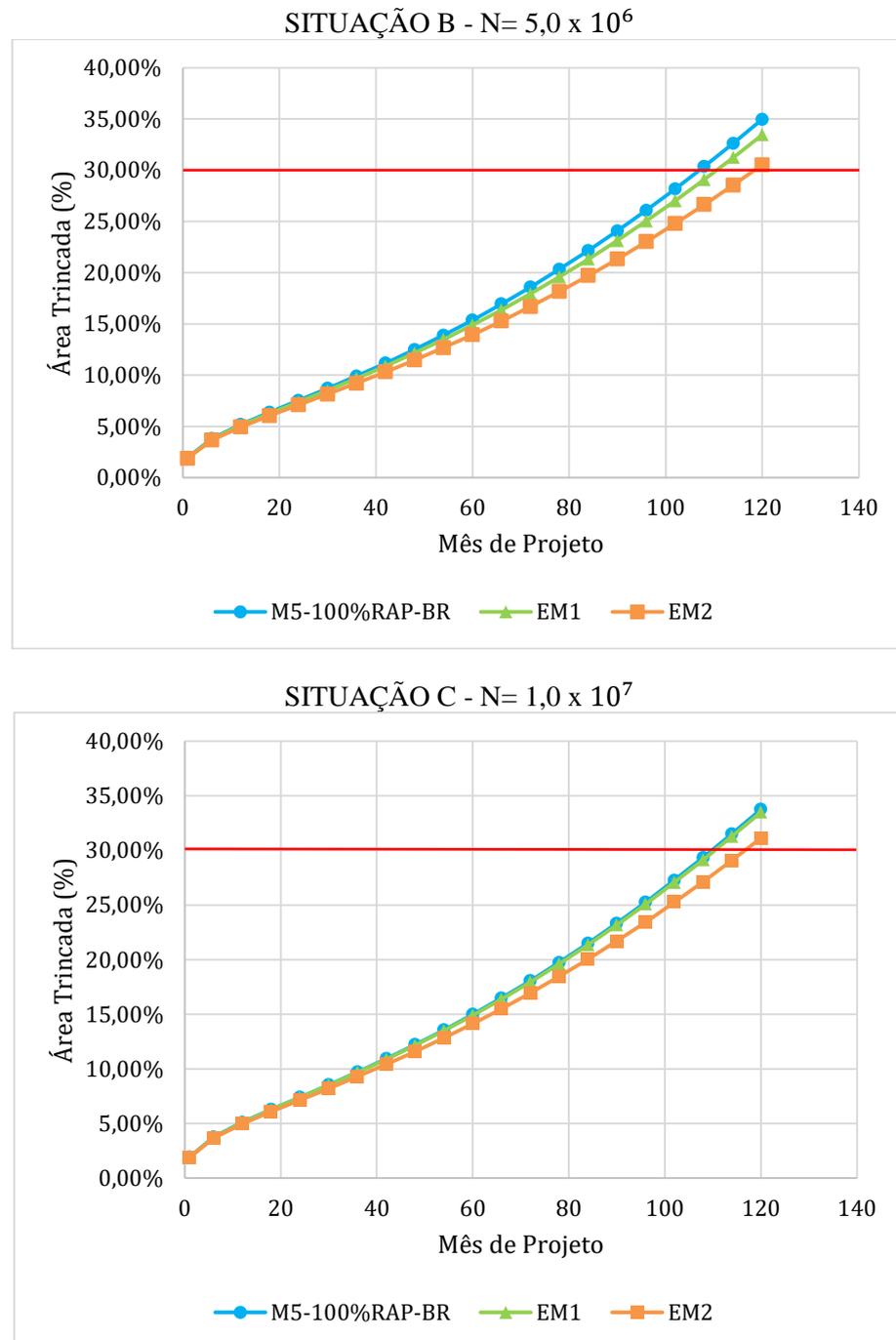
Situação	Revestimento (cm)	Camada Granular (cm)
B N= 5,0 x 10 ⁶ CA (Classe 1) Subleito Solo Horizonte B (PASCOAL, 2020)	10,2	21
C N= 1,0 x 10 ⁷ Revestimento CA (Classe 3) Subleito Solo Horizonte B (PASCOAL, 2020)	12,7	17
D N= 2,5 x 10 ⁷ Revestimento CA (Classe 4) Subleito Solo Horizonte B (PASCOAL, 2020)	16,4	15

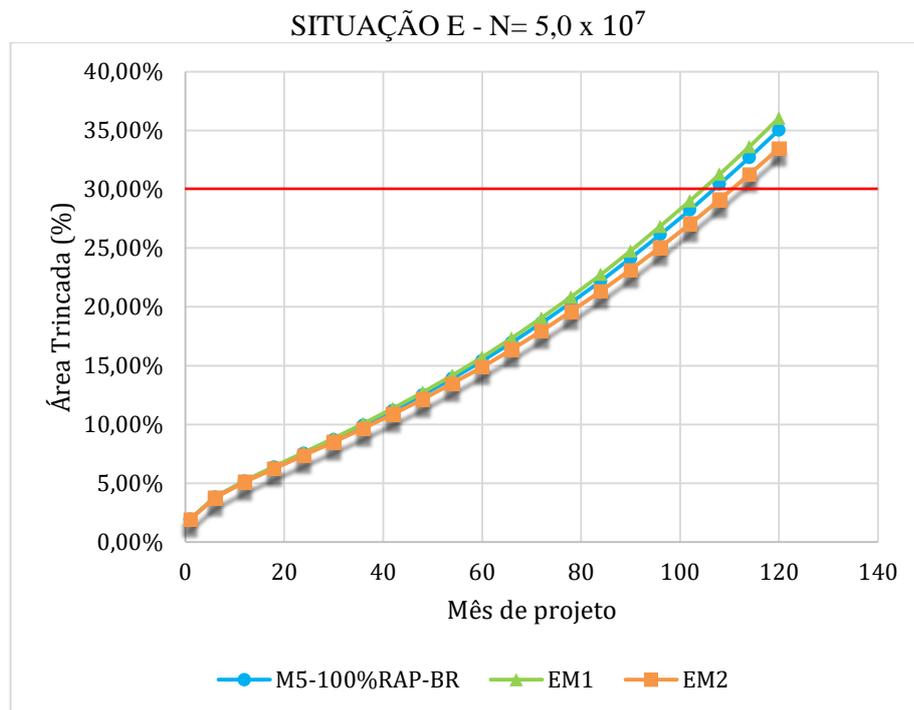
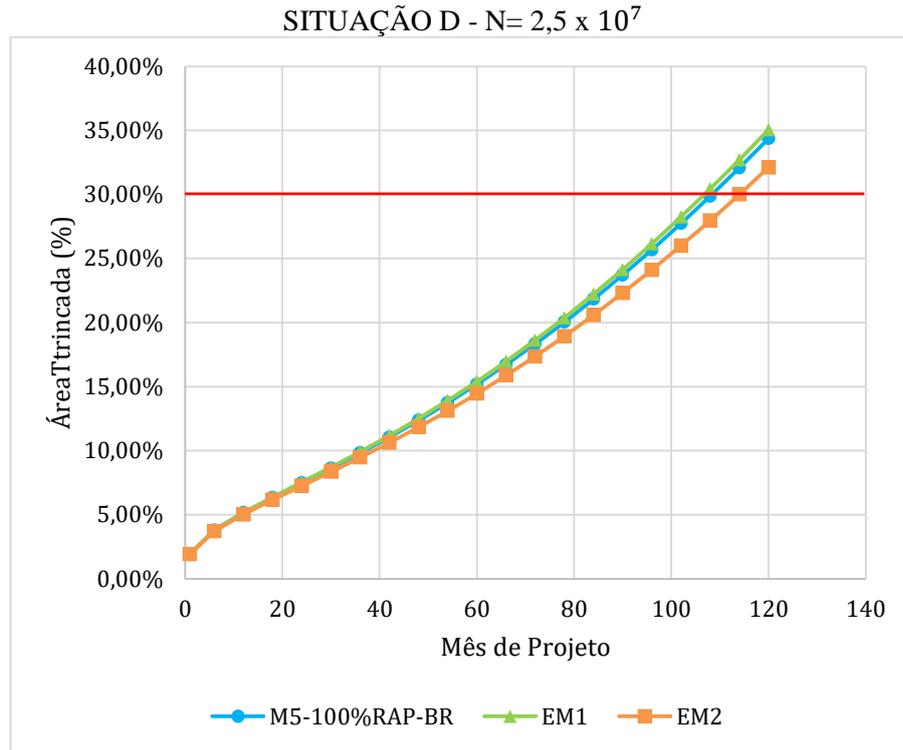
Tabela 17 - Dimensões das camadas do pavimento para cada situação
(conclusão)

E N= 5,0 x 10 ⁷ Revestimento CA (Classe 4) Subleito Solo Horizonte B (PASCOAL, 2020)	21,1	15
---	------	----

Fonte: (SANTOS, 2021).

Figura 18 – Gráficos comparativo de área trincada





Fonte: Autora (2023).

Sabe-se, conforme estudos de Kavussi e Modarres (2010), que a emulsão incorporada à mistura reciclada proporciona ligações flexíveis entre as partículas do agregado fresado, o que resulta em uma maior coesão e em uma maior resistência. Além disso, Dalla Rosa *et al.* (2015), observaram em sua pesquisa que a partir das análises do invariante de tensões em

relação a valores de MR e concluíram que a adição da emulsão asfáltica em misturas recicladas resultou num material menos suscetível a deformações permanentes.

Com base em trabalhos publicados na literatura a respeito do uso de emulsão asfáltica em misturas recicladas a frio, pode-se intuir que a adição de emulsão asfáltica com agente rejuvenescedor possibilitou uma melhora do comportamento das misturas quando comparadas a misturas sem emulsão asfáltica ou emulsão asfáltica adição de agente rejuvenescedor.

5.2.1 Dimensionamento conforme Medina

Com o propósito de realizar o comparativo quanto aos valores de espessura da camada de revestimento, foram analisados o material M5-100%RAP-BR de Santos (2021) e o material EM2, o qual apresentou melhor desempenho frente aos parâmetros analisados neste estudo. Para isso fixou-se os valores apresentados anteriormente para camadas de base, solicitando que o MeDiNa dimensionasse a estrutura alterando somente as espessuras de revestimento, obteve-se os seguintes resultados demonstrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Dimensionamento conforme MeDiNa

Situação	Material	Revestimento (cm)	Camada Granular (cm)
B N= 5,0 x 10 ⁶ CA (Classe 1) Subleito Solo Horizonte B (PASCOAL, 2020)	EM2	10,6	21
	M5-100% RAP-BR	11,5	21
C N= 1,0 x 10 ⁷ Revestimento CA (Classe 3) Subleito Solo Horizonte B (PASCOAL, 2020)	EM2	13,2	17
	M5-100% RAP-BR	13,7	17
D N= 2,5 x 10 ⁷ Revestimento CA (Classe 4) Subleito Solo Horizonte B (PASCOAL, 2020)	EM2	17,0	15
	M5-100% RAP-BR	17,3	15
E N= 5,0 x 10 ⁷ Revestimento CA (Classe 4) Subleito Solo Horizonte B (PASCOAL, 2020)	EM2	21,8	15
	M5-100% RAP-BR	22,4	15

Fonte: Autora (2023).

Considerando os resultados apresentados, foi possível perceber uma redução nas espessuras de revestimento para a mistura EM2 como camada de base, demonstrando melhor desempenho frente a esse parâmetro. Pode-se perceber que com o aumento do nível de tráfego e solicitações, essa redução tende a diminuir. No entanto, vale ressaltar que quando consideramos a situação B, com menor nível de tráfego, essa diferença é próxima a 1 cm, podendo representar impacto considerável em relação à redução do volume de material asfáltico e possibilitando uma economia de recursos. Todavia, é necessário avaliar se a redução de espessura é suficiente para viabilizar o uso de emulsão em cada situação específica de obra, levando em consideração aspectos como logísticos, disponibilidade de material fresado, se o método de mistura do material será em usina ou em campo, etc.

Além disso, é importante salientar que as estruturas analisadas são avaliadas perante situações de tráfego médio a pesado, como consequência, apresentaram valores altos de espessuras para camadas de revestimento. Nessa situação, é possível que as tensões cheguem atenuadas na camada de base, dessa forma, para avaliar uma influência mais significativa do material emulsão, seria possível reduzir as espessuras de revestimentos, o que aumentaria as tensões que chegam na camada de base. Isso possivelmente poderia possibilitar ganhos em relação as diferenças de área trincada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por fim, foi possível observar, por meio dos ensaios e parâmetros analisados no presente trabalho, que as misturas estudadas, possuem capacidade de desempenhar suas funções como camada de base de pavimentos asfálticos perante às solicitações de tráfego. As misturas estudadas, demonstraram desempenho superior ou equivalente nos parâmetros analisados, quando comparados a misturas compostas somente de material fresado, sem adição de emulsão. Ainda, quando usadas como camada de base, as estruturas apresentaram redução de espessuras nas camadas de revestimentos, maior resistência a fadiga e consequentemente atingindo uma vida útil maior, segundo análises feitas pelo MeDiNa.

Percebe-se que as diferenças foram significativas, contudo, para obter resultados de desempenho mecânico mais expressivos nas misturas como camada de base, é possível explorar a adição de materiais cimentantes hidráulicos, como cal ou cimento, com o objetivo de elevar ainda mais os valores de módulos de resiliência dessas misturas além de reduzir as tensões na camada de revestimento asfáltico, as quais levam à fadiga. Uma vez que, os materiais cimentantes são capazes de promover a dispersão da emulsão pela mistura, reduzir a suscetibilidade à umidade, melhorar adesão do ligante aos agregados, etc.

Além disso, levando em consideração os resultados de desempenho significativo das misturas deste trabalho, é possível pensar na utilização destes materiais como revestimento de pavimento do tipo tratamento superficial. Visto que, os materiais se apresentam como uma alternativa viável do ponto vista da durabilidade, da alta produtividade e rapidez na execução e liberação dos serviços, além de evitar problemas ambientais, de saúde e de segurança, visto que o mesmo é aplicado em temperatura ambiente.

Para concluir, pode-se dizer que este estudo buscou contribuir para melhorar a qualidade de pavimentos asfálticos e, concomitantemente, mitigar os impactos ambientais causados pela disposição final inadequada dos resíduos asfálticos

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista algumas lacunas que não foram avaliadas neste trabalho e compreendendo a importância do desenvolvimento da reciclagem a frio de pavimentos, ficam como sugestões:

- Obter uma análise de viabilidade econômica comparativa das misturas com uso de emulsão em relação as misturas que possuem somente material fresado;
- Avaliar a deformação permanente das misturas e a influência da temperatura no desempenho mecânico;
- Avaliar o desempenho das misturas estudadas para utilização como revestimento do tipo tratamento superficial;
- Implementar trechos experimentais utilizando estes materiais com o objetivo de analisar a viabilidade de execução em campo;
- Verificar a influência da adição de materiais cimentantes hidráulicos, nestas misturas, quanto ao comportamento mecânico, considerando a viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

- AASHTO. **Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**. AASHTO T 315. Washington, DC, 2020.
- ALMEIDA, P. O. B. JÚNIOR. **Reciclagem de misturas 100%RAP: investigação de parâmetros para avaliação e dosagem de agentes rejuvenescedores com foco na fadiga**. 2022. 401 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.
- ARRA. **Basic Asphalt Recycling Manual First Edition**. U.S. Department of Transportation. Washington, Estados Unidos, 2001.
- ARRA. **Basic Asphalt Recycling Manual Second Edition**. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2015.
- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560p.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.
- BEZERRA NETO, R. S. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecânicos e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. 2004. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3. ed. São Paulo: Exceção Editorial, 2010.
- BRITO, L. A. T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. 2006. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- BRONDANI, C. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a frio com emulsão e cimento Portland**. Tese em elaboração (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.
- CBB Asfaltos. Disponível em: <https://www.cbbasfaltos.com.br/>. Acesso em: 22 jun. 2023.
- CORREA, B. M. **Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de RAP**. 2020. 149 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.
- COSTA, C.; PINTO, S. O uso de reciclagem de pavimentos, como alternativa para o desenvolvimento sustentável em obras rodoviárias no Brasil. **Revista Traços**, v. 12, n. 26, p. 39-58, 2010.

DALLA ROSA, F. *et al.* Análise do comportamento mecânico de um pavimento reciclado com adição de diferentes agentes estabilizadores. **Transportes**, v. 23, n. 2, p. 95-104, 2015.

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

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. 2006. 152p.

DNIT-ES. **Norma 141/2010**. Pavimentação asfáltica – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010, 9p.

DNIT-ME. **Norma 134/2018**: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018, 18p.

FRANCO, F. A. C. da P.; MOTTA, L. M. G. da. **Relatório Parcial IV (A)**. Meta 4: guia para utilização de Método Mecânico-Empírico. Apresentação dos Programas Desenvolvidos, 2018. 70p.

GEWEHR, J. **Asfalto de qualidade**. 2021. Disponível em: <https://asfaltodequalidade.blogspot.com/2021/09/uso-de-material-asfaltico-reciclado-rap.html>. Acesso em: 22 jun. 2023.

GUATIMOSIM, F. V. **Mechanical Behavior and Structural Performance of Recycled Foamed Bitumen**. 2015. 127 f. Dissertação. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GUIMARÃES, A. C. R. **Método mecanístico empírico para previsão de deformação em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009. 367 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

KAVUSSI, A.; MODARRES, A. Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement. **Construction and building materials**, v. 24, n. 10, p. 1920-1927, 2010.

KIM, Y. R. **Modeling of asphalt concrete**. American Society of Civil Engineers, McGraw-Hill Construction, 1ª Ed. 2009.

MARMITT, H. M.; CASAGRANDE, M. D. T.; CERATTI, J. A. P. **Caracterização de propriedades resilientes de três britas graduadas utilizadas em pavimentos no sul do Brasil** *Characterization of the resilient properties of the three kinds of graduates in pavements in south of Brazil*. Disponível em: http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art7_N15.pdf. Acesso em: 2 jun. 2023.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica de pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 2005.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MEDINA, J.; PREUSSLER, E. S. Características Resilientes de Solos em Estudos de Pavimentos. Solos e Rochas. **Associação Brasileira de Mecânica dos Solos**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p. 3-26, 1980

MOTTA, L. M.; PINTO, S.; GUARÇONI, D. S. Trecho de reciclagem a frio na BR-393 – Avaliação após 8 anos da implantação. *In*: 16º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo. **Anais**. Rio de Janeiro, 2002.

MOTTA, R.; BERNUCCI, L. B.; FARIA, V. C. de. **Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidas com baixa energia**. Disponível em:

[https://agenciacaracara.com.br/wp-](https://agenciacaracara.com.br/wp-content/uploads/2014/01/book_revista_antt_2.pdf#page=142)

[content/uploads/2014/01/book_revista_antt_2.pdf#page=142](https://agenciacaracara.com.br/wp-content/uploads/2014/01/book_revista_antt_2.pdf#page=142). Acesso em: 29 abr. 2023.

PARANHOS, C. A. S.; TUCHUMANTEL JR, O. **Reciclagem a frio**. *In*: 11º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo. **Anais**. Rio de Janeiro, p-255-288, 1992.

PASCOAL, P. T. **Estudo da influência da compactação no comportamento resiliente e deformação permanente de solo laterítico do Rio Grande do Sul**. 2020. 184 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, 2020.

SANTOS, E. F. **Reciclagem de materiais fresados de diferentes fontes em misturas estabilizadas para uso em camadas granulares de pavimentos**. 2021. 206 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa maria, 2021.

TANSKI, M. C. **Comportamento Mecânico de Material Reciclado a frio com emulsão e cimento**. 2016. 169 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

UNGER FILHO, W. **Estudo de mistura asfáltica reciclada a frio produzida com 100% de revestimento asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsionado**. 2019. 169 f. Dissertação (mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

WIRTGEN. **Cold Recycling - Wirtgen Cold Recycling Technology**. Windhagen: Wirtgen GmbH, 2012.

WIRTGEN GROUP. Disponível em: <https://www.wirtgen-group.com/pt-br/>. Acesso em: 23 jun. 2023.