

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Gabriela Fanck dos Santos

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE EMPREGO DE CIMENTO E  
EMULSÃO ASFÁLTICA PARA ESTABILIZAÇÃO DE BASES  
GRANULARES**

Santa Maria, RS  
2022

Gabriela Fanck dos Santos

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE EMPREGO DE CIMENTO E EMULSÃO  
ASFÁLTICA PARA ESTABILIZAÇÃO DE BASES GRANULARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestra em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Tatiana Cureau Cervo

Santa Maria, RS  
2022

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Santos, Gabriela Fanck dos  
Estudo da viabilidade técnica de emprego de cimento e emulsão asfáltica para estabilização de bases granulares / Gabriela Fanck dos Santos.- 2022.  
162 p.; 30 cm

Orientador: Tatiana Cureau Cervo  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2022

1. Bases estabilizadas 2. Pavimentos 3. Material fresado I. Cervo, Tatiana Cureau II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, GABRIELA FANCK DOS SANTOS, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Gabriela Fanck dos Santos**

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE EMPREGO DE CIMENTO E EMULSÃO  
ASFÁLTICA PARA ESTABILIZAÇÃO DE BASES GRANULARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do grau de **Mestra em Engenharia Civil**.

Aprovado em 12 de setembro de 2022:

---

**Tatiana Cureau Cervo, Dra. (UFSM)**  
**(Presidente/Orientadora)**

---

**Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)**

---

**Gracieli Bordin Colpo, Dra. (PUCRS)**

Santa Maria, RS  
2022

Aos meus pais, Linonrose e Renato, que desde o início me incentivaram a realizar esse sonho, com todo o amor, carinho e compreensão em todos os momentos.

## AGRADECIMENTOS

Deixo meus sinceros agradecimentos aos seguintes:

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil que possibilitou a realização do Mestrado no decorrer desse período.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e ao Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) da UFSM por toda a disponibilização de material, equipamentos e pessoal.

À CAPES pelo apoio financeiro através de bolsa de estudos presente ao longo do Mestrado.

À empresa CBB Asfaltos pela disponibilização da emulsão asfáltica necessária para a pesquisa.

À minha orientadora de pós-graduação Profa. Dra. Tatiana Cureau Cervo que acreditou na minha capacidade e me auxiliou no decorrer desse período de pesquisa com um grande apoio e incentivo, mesmo em meio pandêmico causado pelo Coronavírus (Covid-19). Meu muito obrigada pela oportunidade, fostes imprescindível para a realização desse trabalho.

Aos professores membros da banca examinadora, pela disponibilidade.

Aos demais professores da UFSM e/ou membros do GEPPASV: Prof. Dr. Luciano Specht, Prof. Dr. Deividi Pereira, Prof. Dr. Magno Baroni, Alifer Beier, Silvio Schuster, Cléber Faccin, Pedro Orlando, Bruno Chaves, Diego Custódio e Évelyn Paniz.

Às minhas colegas do GEPPASV e amigas: Chaveli Brondani, Victória Pilar, Alana Fabris e Jéssica Vieira, obrigada por todo o auxílio, as histórias, as risadas, o companheirismo e a parceria. Vocês proporcionaram o período do Mestrado muito mais leve e feliz. Sou grata pelas experiências trocadas, passeios para descontração, cafés na melhor cafeteria e, principalmente, horas extras no laboratório. Minha sincera gratidão a vocês.

À Ana Helena Back pelas diversas reuniões que fizemos via Google Meet, pela disposição em ajudar, pelo repasse de informações importantes acerca dos materiais e que foram essenciais para essa pesquisa.

Aos meus amigos especiais Alifer Beier e Ana Mahl, que me mostraram que apesar das dificuldades precisamos ser fortes e persistir nos nossos sonhos e objetivos. Grata pela nossa amizade existir, pela convivência e também por me

escutarem quando eu mais precisei. Grata pelas conversas longas e desabafos, conselhos, caronas, apoio incondicional e compartilhamento de vida.

Aos funcionários do GEPPASV e UFSM: Fernando Zucchi, Luciane Iop, Eduardo Druzian, Alison Veras e Diego, agradeço pelas orientações, auxílios e pela disponibilização de tempo e compreensão nesse período, em meio à pandemia.

Às colegas do GEOMA: Amanda Sagrilo, Paula Pascoal, Gabriéli Chiarello e Haline Ceccato, agradeço as trocas de experiência, conversas e apoio no período de laboratório.

A todos os alunos de iniciação científica do curso de graduação em Engenharia Civil e aos demais voluntários, em especial ao Lorenzo Chaves, Gabriel Feyh e Luigi Tavares pelos auxílios nas moldagens das amostras e pela disposição nos momentos em que eu precisava. Vocês sempre estavam dispostos em ajudar, muito obrigada.

Aos meus pais Linonrose Fanck e Renato dos Santos, serei eternamente grata. À toda minha família, em especial: Sirlei Maria Fanck, Ivete dos Santos, Mara e Adilson de Oliveira, agradeço por estarem sempre ao meu lado, por serem o meu apoio e fonte segura, além da compreensão durante esse período um pouco distante de vocês. Agradeço também a minha família em Santa Maria, Alano Fanck e Marília Sousa, obrigada pela companhia quando me sentia sozinha e por todo o incentivo que me deram. Agradeço à Deus por vocês existirem e por zelar pelas nossas vidas. Amo vocês!

Expresso a minha gratidão ao meu companheiro há 7 anos, por todo apoio e segurança e por me fazer enxergar sempre o lado bom de todos os acontecimentos. Agradeço por abdicar tempo de suas férias e finais de semana para me auxiliar em alguns momentos desse trabalho e por me apoiar emocionalmente, sem você com certeza eu não teria conseguido finalizar mais essa etapa, obrigada por tudo Renan Schmitt de Oliveira. Te amo!

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.*

## RESUMO

### ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE EMPREGO DE CIMENTO E EMULSÃO ASFÁLTICA PARA ESTABILIZAÇÃO DE BASES GRANULARES

AUTORA: Gabriela Fanck dos Santos  
ORIENTADORA: Tatiana Cureau Cervo

Um pavimento de qualidade é de suma importância para o desenvolvimento e deslocamento da população. Diversos pavimentos já atingiram o fim da sua vida útil, carecendo de manutenções ou incremento estrutural. Dito isso, o material fresado proveniente da fresagem de pavimentos vem sendo largamente utilizado por diversos pesquisadores. Todavia, verifica-se que é preciso encontrar uma alternativa para reaproveitar o pavimento reciclado, de modo a propiciar economia, sustentabilidade e viabilidade de aplicação. O estudo tem por objetivo analisar a viabilidade técnica de misturas com fresado asfáltico em substituição aos agregados naturais, estabilizados com emulsão asfáltica e cimento, em diferentes teores, para emprego em camada de base de pavimentos asfálticos. Para tal, foram realizados ensaios laboratoriais de resistência à compressão simples (RCS), de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR) e um resultado inicial ao ensaio de fadiga para essas misturas. Os ensaios abordados são conduzidos a partir da execução de dois modelos de misturas, uma é denominada referência (REF), com agregados naturais e a outra é com material fresado (FP), ambas matrizes enquadradas nas respectivas faixas granulométricas. Sendo assim, os teores de emulsão asfáltica (RL – 1C) aplicados são 0%, 2% e 3% e os teores de cimento Portland (CP – IV32) utilizados são de 1% e 3%. As curvas de compactação foram realizadas por meio de Proctor, na energia modificada e os corpos de prova moldados por meio de soquete e compactador Marshall. O processo de cura inicial das amostras ocorreu em duas etapas, em um pequeno conjunto de amostras as misturas foram curadas em câmara úmida e o outro conjunto de amostras ficaram curando em estufa. O período total de cura foi de 28 dias. A partir dos resultados de resistência e rigidez obtidos por meio do desenvolvimento metodológico pôde-se identificar que: na análise do processo de cura, a mesma influenciou nos resultados da RCS e RT, apresentando de forma geral a estufa como a melhor forma de cura; o aumento no teor de cimento e de emulsão trouxe melhorias para as resistências e rigidezes; a mistura com agregados naturais se sobressaiu na RCS e no MR em relação àquelas com fresado, porém, na RT o comportamento é contrário; as características dos materiais refletem em alguns aspectos, contudo uma densidade maior não é garantia de melhor desempenho mecânico, devido a heterogeneidade das amostras; a porosidade/teor volumétrico de cimento mostrou-se eficiente para verificação do comportamento das misturas estudadas; a fadiga apresentou-se satisfatória para mistura reciclada a frio com emulsão asfáltica e cimento Portland. Julga-se que essa pode ser uma boa alternativa técnica e econômica para destinação do material fresado que é obtido demasiadamente em obras rodoviárias.

**Palavras-chave:** Bases estabilizadas. Pavimentos. Material fresado.



## ABSTRACT

### STUDY OF THE TECHNICAL FEASIBILITY OF USING CEMENT AND ASPHALT EMULSION FOR STABILIZATION OF GRANULAR BASES

AUTHOR: Gabriela Fanck dos Santos  
SUPERVISOR: Tatiana Cureau Cervo

Quality pavement is of paramount importance for the development and displacement of the population. Several floors have already reached the end of their useful life, requiring maintenance or structural improvement. That said, the milled material from pavement milling has been widely used by several researchers. However, it appears that it is necessary to find an alternative to reuse the recycled pavement, in order to provide economy, sustainability, and feasibility of an application. The study aims to analyze the technical feasibility of mixtures with milled asphalt to replace natural aggregates, stabilized with asphalt emulsion and cement, at different levels, for use in the base layer of asphalt pavements. To this end, laboratory tests of simple compressive strength (RCS), tensile strength by diametral compression (RT), modulus of resilience (MR), and an initial result of the fatigue test were carried out for these mixtures. The tests discussed are conducted from the execution of two models of mixtures, one is called reference (REF), with natural aggregates and the other is with milled material (FP), both matrices framed in the respective granulometric ranges. Therefore, the levels of asphalt emulsion (RL – 1C) applied are 0%, 2% and 3% and the levels of Portland cement (CP – IV32) used are 1% and 3%. The compaction curves were performed using Proctor, in modified energy and the specimens were molded using a Marshall socket and compactor. The initial curing process of the samples occurred in two stages, in a small set of samples the mixtures were cured in a humid chamber and the other set of samples were cured in an oven. The total curing period was 28 days. From the results of resistance and rigidity obtained through the methodological development, it was possible to identify that: in the analysis of the curing process, it influenced the results of RCS and RT, generally presenting the oven as the best way of curing; the increase in the cement and emulsion content brought improvements in strength and stiffness; the mixture with natural aggregates stood out in RCS and MR in relation to those with milled, however, in RT the behavior is opposite; the characteristics of the materials reflect in some aspects, however, a higher density is not a guarantee of better mechanical performance, due to the heterogeneity of the samples; the porosity/volumetric content of cement proved to be efficient to verify the behavior of the studied mixtures; fatigue was satisfactory for cold recycled mixture with asphalt emulsion and Portland cement. It is believed that this can be an excellent technical and economical alternative for the destination of the milled material that is obtained too much in road works.

**Keywords:** Stabilized bases. Pavement. RAP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de ruptura das emulsões asfálticas catiônicas.....	42
Figura 2 – Estrutura da pesquisa em formato de fluxograma .....	63
Figura 3 – Amostra de teste com emulsão asfáltica misturada à mão .....	65
Figura 4 – Ensaio de RT para amostras sem emulsão asfáltica .....	65
Figura 5 – Formações geológicas e localização da coleta dos agregados .....	67
Figura 6 – Aparência dos agregados naturais .....	68
Figura 7 – Aparência do RAP da RS-400 utilizado na pesquisa .....	69
Figura 8 – Armazenamento da emulsão asfáltica utilizada.....	70
Figura 9 – Armazenamento do cimento CP IV utilizado .....	73
Figura 10 – Curvas granulométricas das misturas enquadradas nas respectivas faixas .....	75
Figura 11 – Ensaio de compactação Proctor.....	76
Figura 12 – Moldes cilíndricos para a pesquisa – (a) Ensaio de RT/MR; (b) Ensaio de RCS .....	78
Figura 13 – Amostras moldadas curando em estufa à 60°C.....	78
Figura 14 – Equipamentos utilizados para confecção das amostras .....	79
Figura 15 – Equipamentos e amostras de RCS .....	80
Figura 16 – Equipamentos e amostras de RT/MR.....	81
Figura 17 – Amostras de RCS capeadas com 3mm de argamassa .....	82
Figura 18 – Prensa dedicada ao ensaio de RT e corpo de prova rompido .....	83
Figura 19 – Prensa UTM – 25 dedicada ao ensaio de MR e amostras sendo ensaiada .....	84
Figura 20 – Curvas de compactação para as misturas de referência .....	92
Figura 21 – Curvas de compactação para as misturas recicladas.....	92
Figura 22 – Relação da forma de cura e RCS (MPa) para quatro misturas selecionada .....	95
Figura 23 – Resultados de RCS (MPa) médios para as misturas propostas .....	98
Figura 24 – Amostras rompidas à compressão simples .....	100
Figura 25 – Variação da RCS em relação à porosidade das misturas referência...	101
Figura 26 – Variação da RCS em relação à porosidade e $\eta/C\%$ para as misturas recicladas.....	102

Figura 27 – Relação do teor de emulsão asfáltica (%) e RCS (MPa) para as misturas REF .....	104
Figura 28 – Relação do teor de emulsão asfáltica (%) e RCS (MPa) para as misturas FP .....	105
Figura 29 – Relação do teor cimento CP IV (%) e RCS (MPa) para as misturas REF .....	106
Figura 30 – Relação do teor cimento CP IV (%) e RCS (MPa) para as misturas FP .....	107
Figura 31 – Relação da forma de cura e RT para quatro misturas selecionadas....	109
Figura 32 – Comparativo com outras pesquisas relacionando a forma de cura e RT (MPa).....	109
Figura 33 – Resultados de RT (MPa) médios para as misturas propostas .....	111
Figura 34 – Comparativo com outras pesquisas dos resultados de RT (MPa) das misturas propostas.....	113
Figura 35 – Variação da RT em relação à porosidade e $\eta/C\%$ para as misturas de referência.....	114
Figura 36 – Variação da RT em relação à porosidade e $\eta/C\%$ para as misturas recicladas.....	115
Figura 37 – Relação do teor de emulsão asfáltica (%) e RT (MPa) para as misturas REF .....	117
Figura 38 – Relação do teor de emulsão asfáltica (%) e RT (MPa) para as misturas FP .....	117
Figura 39 – Relação do teor cimento CP IV (%) e RT (MPa) para as misturas REF .....	118
Figura 40 – Relação do teor de cimento CP IV (%) e RT (MPa) para as misturas FP .....	119
Figura 41 – Relação da forma de cura e MR (MPa) para quatro misturas selecionadas .....	121
Figura 42 – Resultados de MR (MPa) médios para as misturas propostas .....	123
Figura 43 – Comparativo com outras pesquisas dos resultados de MR (MPa) das misturas propostas.....	124
Figura 44 – Variação Do MR em relação à porosidade e $\eta/C\%$ para as misturas de referência.....	127

Figura 45 – Variação do MR em relação à porosidade e $\eta/C\%$ para as misturas recicladas.....	128
Figura 46 – Relação do teor de emulsão asfáltica (%) e MR (MPa) para as misturas REF .....	129
Figura 47 – Relação do teor de emulsão asfáltica (%) e MR (MPa) para as misturas FP .....	130
Figura 48 – Relação do teor de cimento (%) e MR (MPa) para as misturas REF ...	131
Figura 49 – Relação do teor de cimento (%) e MR (MPa) para as misturas FP .....	132
Figura 50 – Vida de fadiga em função da relação entre tensões .....	134
Figura 51 – Vida de fadiga em função da tensão de tração.....	135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Determinação da execução de BGTC para camadas de base .....	25
Tabela 2 – Faixas granulométricas para execução da BGTC.....	25
Tabela 3 – Resistência e cura dos tipos de cimento Portland .....	27
Tabela 4 – Pesquisas com a utilização de cimento Portland em pavimentação .....	28
Tabela 5 – Umidade ótima e energia de compactação usualmente empregadas.....	29
Tabela 6 – Pesquisas realizadas nacional e internacionalmente com as formas de cura adotadas .....	49
Tabela 7 – RCS e MR aos 28 dias de cura em camadas cimentadas .....	52
Tabela 8 – Nomenclatura dos CPs e quantidade de CPs por ensaio .....	64
Tabela 9 – Propriedades dos agregados.....	68
Tabela 10 – Teor de ligante do RAP 50/70 e densidade .....	70
Tabela 11 – Ensaio de caracterização da emulsão asfáltica .....	71
Tabela 12 – Ensaio de caracterização do ligante asfáltico contido na emulsão, obtido por evaporação (NBR 14896) .....	72
Tabela 13 – Ensaio de caracterização para o cimento .....	73
Tabela 14 – Granulometria das misturas propostas .....	75
Tabela 15 – Teores ótimos encontrados nas misturas .....	93
Tabela 16 – Resultados médios de RCS (MPa) em relação ao processo de cura....	95
Tabela 17 – Test-t para os resultados médios de RCS (MPa) em relação ao processo de cura.....	96
Tabela 18 – Resultados de RCS (MPa) médios .....	97
Tabela 19 – Test-t para os resultados de RCS (MPa) médios para as misturas propostas .....	99
Tabela 20 – Resultados médios de RT em relação ao processo de cura .....	108
Tabela 21 – Test-t para os resultados médios de RT (MPa) em relação ao processo de cura.....	110
Tabela 22 – Resultados de RT (MPa) médios .....	111
Tabela 23 – Test-t para os resultados de RT (MPa) médios para as misturas propostas .....	112
Tabela 24 – Resultados médios de MR (MPa) em relação ao processo de cura....	121
Tabela 25 – Test-t para os resultados médios de MR (MPa) em relação ao processo de cura.....	122

Tabela 26 – Resultados de MR (MPa) médios .....	123
Tabela 27 – Test-t para os resultados de MR (MPa) médios para as misturas propostas .....	125
Tabela 28 – Resultados do ensaio de fadiga .....	134

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEM	<i>Asphalt Emulsion Mixture</i>
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AR	Agente Rejuvenescedor
ARE	Agente Rejuvenescedor Emulsionado
ARRA	<i>Asphalt Recycling e Reclaiming Association</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CPs	Corpos de Prova
CRAM	<i>Cold Recycled Asphalt Mixture</i>
CRME	<i>Cold Recycled Mixture by Emulsion and Cement</i>
CSM	<i>Cement Stabilized Macadam</i>
DAER	Departamento Autônomo de Estrada de Rodagem
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DMM	Densidade Máxima Medida
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DP	Desvio Padrão
EAP	Emulsão Asfáltica
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
EM	Especificação de Material
ES	Especificação de Serviço
FAM	<i>Foamed Asphalt Mixture</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FP	Fresado e Pó de pedra
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
IDT	<i>Splitting Test</i>

ISC	Índice de Suporte Califórnia
ITS	<i>Indirect Tensile Strength</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
MAAT	Mistura Asfáltica Antirreflexão de Trincas
MCE	<i>Mineral-Cement Emulsion Mixtures</i>
ME	Método de Ensaio
MeDiNa	Novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos Flexíveis do Brasil
MR	Módulo de Resiliência
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RCS	Resistência a Compressão Simples
REF	Referência
RL	Ruptura Lenta
RM	Ruptura Média
RR	Ruptura Rápida
RS	Rio Grande do Sul
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
U\$	Dólares
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
°C	Graus Celsius
cm	Centímetros
D	Diâmetro do corpo de prova
g/cm <sup>3</sup>	Grama por centímetro cúbico
H	Altura do corpo de prova
kg/cm <sup>3</sup>	Quilogramas por centímetros cúbicos
km	Quilômetros
kN	Quilonewton
mm	Milímetros
MPa	Megapascal



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1	OBJETIVOS .....	18
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	19
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	19
1.2	ORGANIZAÇÃO GERAL DA PESQUISA .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
2.1	ESTABILIZAÇÃO DOS MATERIAIS NA PAVIMENTAÇÃO .....	21
2.1.1	<b>Camada de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)</b> .....	23
2.1.2	<b>Efeito da compactação e umidade ótima em misturas estabilizadas</b> ....	28
2.2	RECICLAGEM NA PAVIMENTAÇÃO .....	30
2.2.1	<b>Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)</b> .....	34
2.2.2	<b>Pesquisas com a utilização de material fresado e cimento</b> .....	35
2.3	EMULSÃO ASFÁLTICA.....	40
2.3.1	<b>Pesquisas empregando emulsões asfálticas e cimento</b> .....	43
2.3.2	<b>Processos de cura para camadas estabilizadas quimicamente</b> .....	48
2.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS.....	51
2.4.1	<b>Resistência à compressão simples (RCS)</b> .....	51
2.4.2	<b>Resistência à tração por compressão diametral (RT)</b> .....	54
2.4.3	<b>Módulo de Resiliência (MR)</b> .....	56
2.4.4	<b>Ensaio de fadiga à tração por compressão diametral</b> .....	58
2.4.5	<b>Porosidade e teor volumétrico de cimento das misturas</b> .....	60
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>62</b>
3.1	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA .....	62
3.2	MATERIAIS EMPREGADOS.....	66
3.2.1	<b>Agregados pétreos</b> .....	66
3.2.2	<b>Material fresado (RAP)</b> .....	69
3.2.3	<b>Emulsão asfáltica (RL – 1C)</b> .....	70
3.2.4	<b>Cimento Portland</b> .....	72
3.2.5	<b>Água</b> .....	74
3.3	PROCEDIMENTOS.....	74
3.3.1	<b>Granulometria das misturas</b> .....	74
3.3.2	<b>Compactação para determinação da umidade ótima das misturas</b> .....	76

<b>3.3.3</b>	<b>Moldagem e cura dos corpos de prova para ensaios mecânicos</b> .....	77
<b>3.3.4</b>	<b>Método de Ensaio</b> .....	81
3.3.4.1	Resistência à Compressão Simples (RCS) .....	81
3.3.4.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT).....	83
3.3.4.3	Módulo de Resiliência (MR).....	84
3.3.4.4	Ensaio de fadiga – Modo Tensão Controlada .....	85
<b>3.3.5</b>	<b>Porosidade e teor volumétrico de cimento das misturas</b> .....	88
<b>4</b>	<b>CONTRIBUIÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>91</b>
4.1	COMPACTAÇÃO E UMIDADES ÓTIMAS .....	91
4.2	ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS).....	94
<b>4.2.1</b>	<b>Efeito do teor de emulsão asfáltica nas misturas</b> .....	104
<b>4.2.2</b>	<b>Efeito do teor de cimento Portland CP IV nas misturas</b> .....	106
4.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT).....	108
<b>4.3.1</b>	<b>Efeito do teor de emulsão asfálticas nas misturas</b> .....	117
<b>4.3.2</b>	<b>Efeito do teor de cimento Portland CP IV nas misturas</b> .....	118
4.4	ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR).....	121
<b>4.4.1</b>	<b>Efeito do teor de emulsão asfáltica nas misturas</b> .....	129
<b>4.4.2</b>	<b>Efeito do teor de cimento Portland CP IV nas misturas</b> .....	131
4.5	ENSAIO DE FADIGA.....	133
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>138</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS</b> .....	<b>141</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>142</b>
	<b>APÊNDICE A – PARÂMETROS GERAIS REFERENTE ÀS AMOSTRAS DO ENSAIO DE RT, MR E RCS</b> .....	<b>158</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O custo da implantação de rodovias é alto e os materiais convencionais empregados são os principais responsáveis pelo valor total das obras. Por isso, é necessária a busca incessante por alternativas sustentáveis, técnicas inovadoras, além de comprovação de economia e que atue de forma semelhante ou melhor. Nesse sentido, passam a existir obras de menor valor, as quais destinam os resíduos gerados para a restauração de outros pavimentos. Para o bom desempenho do pavimento, a previsão do módulo de resiliência e a vida de fadiga de misturas asfálticas são fundamentais, proporcionando uma maior compreensão das propriedades de rigidez e dano.

Há necessidades de buscar materiais alternativos para pavimentação, em situações onde existe vasta quantidade de resíduos gerados e que são descartados de maneira incorreta. Visto que existem milhares de quilômetros de pavimentos que necessitam de manutenção ou reparo, há uma técnica empregada por diversos pesquisadores no Brasil, que se encontra na disposição dos resíduos oriundos de técnicas de decapagem do revestimento, e é a utilização do próprio material fresado, denominado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) pela bibliografia internacional, gerado em grandes volumes na manutenção dos pavimentos.

Há certa dificuldade em encontrar jazidas com materiais de boa qualidade para executar as camadas de base e sub-base em rodovias, principalmente quando os materiais não atendem as especificações para estabilização granulométrica das camadas de pavimentos. Esse problema pode ser solucionado através de misturas de novos materiais sobre a camada do pavimento, sendo o material fresado uma alternativa que pode melhorar a qualidade das misturas. Entretanto, torna-se necessário encontrar formas de reutilização dos pavimentos reciclados, de forma sustentável e viável na aplicação.

Estudos indicam que para o aumento da resistência da estrutura do pavimento, pode-se optar por adicionar estabilizadores, tendendo a esse ganho. Com isso, a reciclagem de pavimentos com adição de estabilizadores, tais como cal, cimento, emulsão asfáltica e espuma de asfalto, aparecem como possíveis alternativas (JORGE, 2014). Em diversas pesquisas foram constatadas que as características mecânicas dos pavimentos não são prejudicadas com a utilização dos fresados e que, além dessa vantagem, tem-se um fator muito importante, que só traz

impactos positivos, a redução da utilização de recursos naturais, além de conter a disposição inadequada dos fresados, materiais que causam impactos negativos no meio ambiente (KLAMT *et al.*, 2018).

Materiais reciclados provenientes da fresagem de camadas asfálticas são, usualmente, reutilizados em camadas de base de pavimentos (MOREIRA *et al.*, 2003). Os tipos de misturas asfálticas que podem ser construídas por meio da fresagem incluem as misturas recicladas a frio, que é uma das tecnologias de reabilitação de pavimentos que mais cresce, principalmente por sua relação custo-benefício e velocidade de produção. Essa forma de reciclagem à temperatura ambiente reduz o consumo de energia e a emissão de gases poluentes durante a construção do pavimento asfáltico, com vantagens relacionadas à saúde e ao meio ambiente (Bessa *et al.*, 2014).

O presente trabalho visa comparar os principais aspectos de duas matrizes pétreas. Uma delas é uma matriz natural, com agregados virgens e a outra é uma matriz reciclada, com o emprego de RAP e pó de pedra. Propõem-se a estabilização físico-química de ambas as matrizes com o emprego do ligante betuminoso (emulsão asfáltica) e o ligante hidráulico (cimento Portland). A partir de tais distribuições e por meio de ensaios laboratoriais, espera-se atingir os objetivos, com abrangência nas propriedades necessárias de resistência e rigidez das misturas para emprego em camada de base de pavimento. Um parâmetro inicial para o ensaio de fadiga de misturas recicladas também é realizado. Além disso, a pesquisa adequar-se-á para o crescimento do banco de dados dos resultados relacionados a esse tipo de mistura a frio.

A seguir, serão apresentados os objetivos delineados em que essa pesquisa se aplica e as problemáticas envolvidas.

## 1.1 OBJETIVOS

Neste tópico, serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos para a realização do trabalho.

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é determinar a viabilidade técnica de misturas com fresado asfáltico estabilizado com emulsão asfáltica e cimento, em diferentes teores, para emprego em camada de base de pavimentos asfálticos. E, ainda, realizar a comparação de resultados entre as misturas com agregados naturais e com material fresado.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral serão desenvolvidos os objetivos específicos apresentados a seguir:

- a) verificar as propriedades das misturas e sua capacidade de aplicação na camada de base de pavimentos, por meio de ensaios de laboratório: resistências à compressão simples, à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e proporcionar resultados iniciais referente ao número de ciclos para ruptura, através do ensaio de fadiga;
- b) obter e avaliar resultados no que tange o comportamento da resistência e rigidez das misturas contendo diferentes teores de emulsão asfáltica (0%, 2% e 3%) e de cimento Portland (1% e 3%);
- c) comparar os resultados das misturas, tanto da matriz pétreia de referência (agregados naturais) como da matriz reciclada (70% RAP e 30% pó de pedra);
- d) verificar a existência ou não de uma associação significativa entre os diferentes ensaios laboratoriais em relação ao teor de cimento e teor de emulsão asfáltica;
- e) verificar o efeito do teor de cimento, porosidade e da relação porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C\%$ ) nas propriedades de RCS, RT e MR.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO GERAL DA PESQUISA

A estrutura geral é composta por quatro capítulos, os quais serão descritos a seguir:

- I. Introdução: Descrição resumida dos principais conectores desta pesquisa, tais como o cenário das rodovias brasileiras, esclarecimento acerca da importância do desenvolvimento dessa metodologia e a apresentação do objetivo geral e dos objetivos específicos a serem alcançados, bem como a organização do trabalho;
- II. Revisão Bibliográfica: São apresentados os principais conceitos pertinentes para o desenvolvimento da pesquisa. Primeiramente, aborda-se uma contextualização de pavimentos asfálticos, com ênfase nas bases de pavimentos e formas de estabilização de materiais. Em seguida, a reciclagem na pavimentação, o RAP e a emulsão asfáltica com incorporação de cimento Portland, destacando as principais propriedades desses materiais, pesquisas e autores com destaque na área, empregando esses materiais, tanto no Brasil quanto mundialmente. Por fim, apresentam-se tópicos sobre os resultados dos ensaios mecânicos obtidos por outros pesquisadores da área, utilizados para a determinação de parâmetros como o de resistência e de rigidez de misturas dentro do contexto deste trabalho, com uso do material fresado, cimento e emulsão asfáltica;
- III. Metodologia Experimental: Nesta seção são apresentados o planejamento da pesquisa, demonstrando as etapas a serem realizadas e os procedimentos metodológicos em detalhes. Após, são abordados os principais elementos referentes aos materiais empregados com a etapa de caracterização. Para finalizar, são apresentados todos os procedimentos laboratoriais sobre a granulometria, a compactação para determinação da umidade ótima, moldagem e cura dos corpos de prova e de métodos de ensaios aplicados para o estudo;
- IV. Contribuições e Análise de resultados: Apresentação dos resultados frente aos ensaios laboratoriais e comparações realizadas através da análise estatística feita em cada conjunto de dados, em todos os ensaios. Contribuição científica ao banco de dados de pesquisas brasileiras com esses materiais, métodos e resultados;
- V. Conclusões: Apresentação das conclusões do trabalho de forma sintética;
- VI. Sugestões para trabalhos futuros: Tópicos sugestivos para complementação e continuidade da presente pesquisa e ampliação da base de dados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são apresentados conteúdos pertencentes ao tema principal da dissertação e pesquisa realizada para a concretização do estudo, com o propósito de esclarecer as concepções, fundando a pertinência do emprego de base estabilizada com emulsão asfáltica e cimento. Propõem-se difundir os conceitos referentes a técnica de utilização da emulsão asfáltica e cimento para estabilização de bases granulares. Inicialmente é apresentada uma breve contextualização a respeito dos pavimentos asfálticos e suas camadas, em seguida, informações dos materiais protagonistas utilizados neste estudo e, por fim, a descrição dos ensaios mecânicos realizados.

### 2.1 ESTABILIZAÇÃO DOS MATERIAIS NA PAVIMENTAÇÃO

As camadas de base e sub-base são de grande importância para o pavimento, pois estão diretamente ligadas com a qualidade e durabilidade das rodovias, assegurando a capacidade de suporte necessária para o bom funcionamento estrutural do pavimento a longo prazo. Em sua composição, é preciso utilizar materiais com boas características mecânicas que suportem a ação do tráfego sem apresentar deformações altas (QUEIROZ, 2011).

Em norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) 141/2010 – ES (DNIT, 2010a), a estabilização granulométrica é denominada como um processo de melhoria da capacidade resistente de materiais naturais ou misturados, mediante a utilização de compactação oportuna, de forma a conquistar um produto final com propriedades satisfatórias de estabilidade e durabilidade. Define-se base estabilizada granulometricamente como a camada de base, executada pelo processo de estabilização granulométrica. Para Bernucci *et al.* (2022), as misturas estabilizadas granulometricamente devem seguir uma faixa granulométrica proposta pela norma e se evita o uso do termo estabilizar quando não há adições de estabilizantes como a cal ou o cimento.

O uso do material provindo da fresagem de pavimentos asfálticos é passível do estudo de seu potencial para utilização como material granular para pavimentação. Com esse material, a estabilização química com cinza de casca de arroz em conjunto com o cimento Portland foi estudada por Pires *et al.* (2016), através da avaliação por

ensaios laboratoriais, como resistência à compressão simples, à tração por compressão diametral e determinação de módulo de resiliência.

No estudo de Pires *et al.* (2016), objetivando enquadrar a mistura na faixa granulométrica do DNIT, estabeleceu-se 70% de material fresado e 30% de agregado virgem. A faixa da mistura ficou dentro dos limites da Faixa A do DNIT, sendo o material virgem utilizado em 15% de brita 3/4" e 15% de pó de pedra. Essa proporção chamada de 70/30 conjuga de maneira satisfatória a questão técnica e econômica (PIRES *et al.*, 2016). Com a utilização do material virgem foi possível manter a questão técnica ao estabelecer a mistura dentro da Faixa A. Em conformidade com Specht *et al.* (2013), corrigir o material fresado granulometricamente (estabilização granulométrica) e compilar com a estabilização mecânica, torna-se extremamente importante, pois traz consigo o aumento da rigidez e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento do material.

A utilização da estabilização com betume promove vantagens, como a melhora na flexibilidade, cria um material do tipo visco-elástico-plástico, evolui as propriedades de cisalhamento (coesão e resistência à deformação), e aceitação, visto que a emulsão betuminosa é bem conhecida pela indústria da construção, havendo métodos de testes padrão e especificações disponíveis. Em contrapartida, as emulsões geralmente não são manufaturadas no local e isso faz com que o controle precise ser maior, bem como os emulsionantes tornam-se mais custosos, além de ser difícil a sua disponibilidade (WIRTGEN, 2012).

Quando se recuperam camadas de pavimento existentes, com os materiais subjacentes produz-se um novo, que pode ser trabalhado como está, pode-se adicionar materiais granulares sobre ele ou pode ser melhorado com a aplicação de algum aditivo ou agente estabilizador. Segundo a *Asphalt Recycling & Reclaiming Association* (ARRA, 2001), existem no mercado diversas opções de aditivos estabilizadores que podem ser utilizados, seja na forma seca ou líquida, incluindo a cal (hidratada ou cal viva), as cinzas volantes, a emulsão asfáltica (normal, alta flutuação, polimérica), o cimento Portland (seco ou em pasta), entre outros.

Dellabianca (2004) revela que utilizar aditivos químicos como a cal, a emulsão asfáltica e o cimento, sobreposta à reciclagem de pavimentos flexíveis é uma técnica que vem crescendo constantemente desde a década de 40. É o caso do revestimento e base de pavimentos reciclados com estabilizante químico que podem ser encontrados em diversos estados americanos. A reciclagem de base e sub-base com



estabilizantes químicos vem ganhando espaço no Brasil atualmente. Entretanto, se observa a carência quanto a estudos interligados com o comportamento dessas misturas asfálticas, uma vez que os solos brasileiros apresentam especificidades a serem consideradas (PIRES, 2014).

A viabilidade técnica da utilização de agregados reciclados de concreto, misturados à cal hidratada (na proporção de 1 a 6%), foi estudado por Diniz e Melo (2015). O objetivo foi validar a sua aplicação em construção de camadas de pavimento, como base e sub-base, para baixo volume de tráfego, e comparar com misturas de agregados naturais. Para isso, os autores submeteram as amostras a testes de caracterização física e também desempenho mecânico. Foram realizados a granulometria, compactação com energia intermediária e o *California Bearing Ratio* (CBR), sendo classificadas como graduação E do DNIT.

Como breves conclusões, os autores destacaram as boas propriedades mecânicas de agregados reciclados e misturas de cal. Os valores mínimos de CBR (resistência mecânica) ficaram acima dos valores especificados pelo DNIT, resultando em 147%, 155%, 112% e 87%, enquanto que os agregados naturais e reciclados ficaram respectivamente com 45% e 61%. Sendo assim, comprovaram que misturar a cal e agregados reciclados é viável para camadas de pavimento (DINIZ; MELO, 2015).

A combinação de emulsão asfáltica e cimento no processo de reciclagem foi estudada por Tanski (2016) e buscou-se incorporar o ligante asfáltico para melhorar a coesão dos agregados da mistura e seu comportamento frágil em relação às apenas cimentadas. Essa inserção de cimento visou aumentar a rigidez do RAP e o envolvimento deste com a emulsão asfáltica. As misturas cimentadas apresentaram resultados de resistência à deformação permanente e rigidez bem superiores àquelas sem adição de cimento. Além disso, o autor afirma que o resultado obtido é satisfatório quando se refere a mistura reciclada estabilizada como camada de base ou sub-base de pavimento.

### **2.1.1 Camada de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)**

É de extrema importância selecionar a quantidade de aglomerante hidráulico a ser utilizada em uma camada de base. Deve-se considerar os carregamentos impostos pelo tráfego e a situação climática, além de proporcionar durabilidade para

que suas propriedades não sejam afetadas durante a vida de serviço (GUTHRIE; SEBESTA; SCULLION, 2002).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), a brita graduada tratada com cimento (BGTC) começou a ser utilizada no Brasil no final da década de 1970. A BGTC é empregada usualmente como base de pavimentos com revestimentos betuminosos, porém também é empregada como base de pavimentos intertravados ou sub-base de pavimentos de concreto. Na BGTC, em princípio, aplica-se o mesmo material da brita graduada simples (BGS), porém com adição de cimento na proporção de 3 a 5% em peso. A BGS é resultante da mistura de materiais britados, que por peneiramento, são classificados de acordo com o seu diâmetro e unido em frações, formando assim uma mistura tecnicamente bem graduada (BALBO, 2007).

A vida de fadiga de bases cimentadas está baseada na redução do módulo de elasticidade ao longo dos ciclos de carregamento a que são submetidas, sendo um critério para sua determinação (NASCIMENTO, 2017). Laboratorialmente, considera-se que o material rompe por fadiga quando atinge o valor de módulo equivalente a 50% do valor inicial, ou com a ruptura do corpo de prova (MIDGLEY; YEO, 2008).

Ao executar uma BGTC é preciso seguir a norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) - EM 036 (DNER, 1995), que fixa os requisitos gerais e específicos exigíveis de cimento Portland destinado a produção de concreto para obras rodoviárias. Ela apresenta definições, classificação, procedimento de inspeção e condições para aceitar ou não o produto. Entretanto, é preciso ter cautela para utilizar a norma específica conforme o tipo de Cimento Portland a ser empregado na mistura, analisando cada caso isoladamente.

A norma de especificação do Cimento Portland unificou em um só documento os requisitos atualizados das antigas especificações. A norma brasileira NBR 16697 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2018a) especifica os requisitos para o recebimento dos cimentos Portland. Além disso, as determinações para execução de camada composta por mistura de BGTC descrevem características mínimas para os agregados, cimento Portland, mas também para a água. A água que será misturada na BGTC não deve afetar a hidratação do cimento e deve ser considerada potável, estando isenta de matéria orgânica.

Em relação aos agregados, para classificá-los, é necessário que se façam os mesmos ensaios físico-químicos da brita graduada simples, seguindo as normas correspondentes. Portanto, tem-se o ensaio de durabilidade em solução de sulfato de

sódio, DNER-ME 089 (DNER, 1994a); o formato dos agregados, DNER-ME 086 (DNER, 1994b); o equivalente de areia dos finos, DNER-ME 054 (DNER, 1997a); e o desgaste por abrasão Los Angeles, DNER 035 (DNER, 1998a).

Além disso, há uma norma que prescreve como deve seguir a dosagem de BGTC, a NBR 12261 (ABNT, 2013a) – Dosagem de brita graduada tratada com cimento – Procedimento. Alguns critérios de avaliação são prescritos pela NBR 11803 (ABNT, 2013b) e estão apresentados na Tabela 1. Por fim, de acordo com a mesma norma, a Tabela 2 demonstra as peneiras a serem utilizadas e seus respectivos percentuais passantes para executar a BGTC.

Tabela 1 – Determinação da execução de BGTC para camadas de base

<b>Ensaio</b>	<b>NBR 11803 (ABNT, 2013b)</b>
Índice de forma	≤ 2
Abrasão Los Angeles	< 40%
Equivalente de Areia	> 35%
Durabilidade: Sulfato de sódio	< 20%
Durabilidade: Sulfato de magnésio	< 30%

Fonte: Adaptado de NBR 11803 (ABNT, 2013b, p. 2).

Tabela 2 – Faixas granulométricas para execução da BGTC

<b>Peneiras de malhas quadradas</b>		<b>Material passante (%)</b>	
		<b>ABNT</b>	
<b>ASTM</b>	<b>mm</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
2"	50	100	–
1 1/2"	37,5	90-100	–
1"	25	–	100
3/4"	19	50-85	90-100
3/8"	9,5	34-60	80-100
Nº 4	4,8	25-45	35-55
Nº 40	0,42	8-22	8-25
Nº 200	0,075	2-9	2-9

Fonte: Adaptado de NBR 11803 (ABNT, 2013b, p. 2).

Segundo Pugliesi (2018), o cimento é composto por clínquer (mistura de calcário, argila e componentes químicos), diferenciado pela adição de outros materiais como gesso, escória ou argila pozzolânica. Contudo, as diferenças estão presentes na

composição do material, o que impacta suas características e propriedades de resistência, trabalhabilidade, durabilidade e impermeabilidade. Outro ponto importante de se destacar é a disponibilidade dos tipos de cimento em determinadas regiões, pois as demandas do mercado e da região são primordiais no momento da aquisição deste material.

Como se sabe, o teor de cimento, o teor de umidade, a energia de compactação e os tipos de agregados, influenciam no comportamento mecânico da BGTC. As características da resistência mecânica da BGTC são resultado da contribuição de duas fases: do esqueleto granular compactado e a fase da matriz cimentada. A fase do esqueleto granular determina a estabilidade mecânica da BGTC sob o carregamento e a fase da matriz cimentada governa a resistência de ligação entre as partículas (FARIA; KLINSKY, 2022).

Uma proposta de dosagem foi desenvolvida por Silva e Miranda Júnior (2000) onde utilizou-se o material fresado estabilizado com cimento. O processo de dosagem dos autores consistiu em uma série de tentativas para determinação de um teor de cimento que atendessem, aos sete dias de cura, a resistência mínima à compressão simples de 45 kg/cm<sup>2</sup>. A experiência é referente à técnica de reciclagem de camada betuminosa existente em sub-base com a incorporação de cimento Portland, configurando-se em uma sub-base semirrígida análoga à BGTC utilizada no pavimento da pista nova.

Após moldar três corpos de prova para cada teor de cimento (3%, 3,5%, 4% e 4,5%), foi encontrado na dosagem um percentual de 3,9% de cimento para o valor da resistência especificada. Entretanto, por questões de segurança relacionadas aos fatores executivos, os autores adotaram o teor mínimo de 4,2% de cimento incorporado à mistura para execução da reciclagem. O resultado foi obtido com base no ensaio de compressão simples, realizados na mistura para diferentes variações deste aditivo acrescido da segurança relacionada aos fatores executivos (SILVA; MIRANDA JÚNIOR., 2000).

Silva e Miranda Júnior (2000) analisaram em laboratório misturas de material reciclado com cimento em teores variados do aglomerante e energia de compactação, buscando a ação dos comportamentos mecânicos em todas as misturas cimentadas. Como breve conclusão, a autora identificou diferenças entre o comportamento mecânico de materiais cimentados ao variar as distribuições granulométricas e o tipo de solo presente na mistura. A composição de 60% de brita e 5% de cimento (Material

1) apresentou melhor resistência do que a composição 40% de brita e 6% de cimento (Material 2).

Queiroz (2011) estudou a avaliação das propriedades físicas dos materiais utilizados e a avaliação das propriedades mecânicas de misturas com solo, cal e cimento. Os teores de material fresado nas misturas de solo foram de 20%, 25%, 30%, 35%, 40% e 45%, adotando o percentual fixo de 45% de material fresado para adicionar os aglomerantes, por apresentar um CBR de 25%, que atende as especificações do DNIT para aplicação em camada de sub-base. A cal e o cimento foram adicionados nos teores de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% ao percentual fixo. A adição de cimento foi a mais representativa no CBR variando entre 92% a 201%, compatíveis com as especificações.

Estabilizar quimicamente empregando o cimento para aplicação em base e sub-base, tem sido largamente aplicado há muitos anos em várias partes do mundo. Existem diversas formas de estabilização com cimento, dentre elas o solo-cimento tradicional e os materiais melhorados com cimento até o concreto rolado. Adicionar o cimento às misturas é uma forma de incrementá-las, elevando a resistência e a durabilidade frente à presença da água (ARAÚJO; FARIAS; CARVALHO, 2004). A Tabela 3 apresenta os requisitos prescritos pela NBR 16697 (ABNT, 2018a) referente à cura e resistência do cimento Portland.

Tabela 3 – Resistência e cura dos tipos de cimento Portland

Tipo de cimento	Classe	Tempo de pega		RCS (MPa)			
		Início (h)	Final (h)	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
CP III	25-32-40	≥1	≤12	≥8, ≥10 e	≥15, ≥20	≥25, ≥32	≥32, ≥40
CP IV				≥12	e ≥23	e ≥40	e ≥48
CP V	ARI	≥1	≤10	≥24	≥34	–	–

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (2018a, p. 7).

Sachet (2012) confirma que aplicar cimento em grandes quantidades pode afetar de forma negativa a estabilização esperada, pois isso pode ocasionar fissuras de retração e, quando expostas à tráfego pesado, podem apresentar fissuras estruturais por se tornar um material extremamente rígido. Além do supracitado, a Tabela 4 demonstra de forma resumida alguns autores que já realizaram

experimentos com o cimento Portland, bem como os percentuais utilizados, os materiais que compunham suas misturas e o tempo de cura.

Tabela 4 – Pesquisas com a utilização de cimento Portland em pavimentação

<b>Autores</b>	<b>Cimento utilizado</b>	<b>Percentual aplicado</b>	<b>Materiais utilizados</b>	<b>Tempo de cura (dias)</b>
Paiva e Oliveira (2010)	CP II – E	3%	Fresado e agregados virgens	7
Aranha (2013)	CP – II	5%	Fresado e solo	3, 7 e 28
Specht <i>et al.</i> (2013)	CP – IV	De 2% a 5%	Fresado e agregados virgens	7 e 28
Bessa <i>et al.</i> (2014)	CP – II	0%, 1% e 2%	Fresado e emulsão	28
Rosa <i>et al.</i> (2015)	CP – IV	3,5%	Fresado e emulsão	Mínimo de 28
Azevedo <i>et al.</i> (2017)	CP – V – ARI	2%, 4% e 6%	Fresado e agregados virgens	7
Silva (2018)	CP – V	4%, 5% e 6%	Fresado e agregados virgens	7 e 28
Rolim (2020)	CP – IV	4% e 5%	Fresado e agregados virgens	7 e 91
Back (2022)	CP – IV	3,50% e 5,50%	Agregados virgens de duas pedreiras	28 e 91

Fonte: Autora.

### 2.1.2 Efeito da compactação e umidade ótima em misturas estabilizadas

De maneira geral, a compactação exerce uma função importante no desenvolvimento do material reciclado. O desempenho de uma mistura é analisado a partir dos parâmetros relacionados a compactação, umidade ótima e tempo de cura, além da sua estabilidade granulométrica. Para bases cimentadas, o ganho de resistência é direcionado na quantidade do material cimentante, do grau de compactação adotado e da hidratação correta (PAIVA; OLIVEIRA, 2014).

A norma do DNIT – ME 164 (DNIT, 2013a) que estabelece os procedimentos para a realização do ensaio de compactação preconiza três energias de compactação a partir da queda de um peso padrão, são elas: normal (12 golpes por camada); intermediária (26 golpes por camada); e modificada (55 golpes por camada). Essa

compactação deve ser de cinco camadas iguais e cada golpe deve ser distribuído uniformemente sobre a superfície da camada.

Um fator preponderante para a correta compactação é a umidade ideal ou ótima do material, possibilitando o aumento da massa específica aparente. Por isso, a NBR 6457 (ABNT, 2016a) determina que a umidade do material deve ser obtida através da secagem em estufa entre 105°C e 110°C, com a utilização de uma amostra retirada do corpo de prova compactado. Pasche (2016) trabalhou com o material fresado e utilizou outra temperatura de secagem (60°C), devido à volatilidade do ligante asfáltico e o ponto de amolecimento do mesmo sob altas temperaturas.

Ressalta-se que as funções da água durante o processo de reciclagem têm duas funcionalidades: auxiliar o ligante a envolver o material fresado e fornecer à mistura um lubrificante interno no momento da compactação. Entretanto, o excesso de água pode fazer com que a emulsão envolva somente os finos, dificultando a compactação. Utilizar uma quantidade menor de água pode ser a melhor alternativa, pois permite o envolvimento correto do agregado, reduzindo ainda o tempo de secagem (DAVIDSON; BLAIS; CROTEAU, 2004).

O efeito da compactação em misturas asfálticas recicladas a frio, foi estudado por Cross (2003), que utilizando um compactador giratório concluiu que as amostras podem ser compactadas antes ou depois da cura da emulsão, sem efeitos adversos significativos nas massas específicas aparentes. Por fim, Pasche (2016) observou que a quantidade de cimento exerce um grande efeito sobre a resistência à compressão simples do material. Ao aumentar a quantidade de cimento de 3% para 7%, em média, a RCS duplicou. Devido ao estudo do autor se basear nas três energias de compactação, também se observou que, para um mesmo teor de cimento, aumentando a energia de compactação, aumenta a resistência.

A Tabela 5 apresenta algumas pesquisas realizadas por diversos pesquisadores da área com a descrição dos materiais empregados, bem como os percentuais de umidade e energia de compactação.

Tabela 5 – Umidade ótima e energia de compactação usualmente empregadas

(continua)

<b>Pesquisadores</b>	<b>Percentual de umidade</b>	<b>Energia (Proctor)</b>	<b>Materiais utilizados</b>
Oliveira (2003)	7%	Normal	Fresado e agregados

(continuação)

Paiva e Oliveira (2010)	5,6%; 6,6% e 7,6%	Intermediária e modificada	Fresado e agregados
Pasche (2016)	8%	Normal, intermediária e modificada	Fresado e agregados
Tanski (2016)	Sem cimento: 5,7%; 6,9%; 7,5% e 7,6% Com cimento: 6,5%; 7,6%; 7,8% e 6,8%	Modificada	Fresado, pó de pedra, emulsão asfáltica e cimento
Azevedo <i>et al.</i> (2017)	7,1%	Modificada	Fresado, agregados e cimento
Nascimento (2017)	8,5%	Modificada	Agregados e cimento
Silva (2018)	8%	Normal, intermediária e modificada	Fresado, agregados e cimento
Antão <i>et al.</i> (2019)	5,5%	Modificada	Fresado, emulsão asfáltica e cimento
Rolim (2020)	5%	Normal, intermediária e modificada	Fresado, agregados, cimento e cal
Back (2022)	Entre 7% e 8,50%	Modificada	Agregados e cimento

Fonte: Autora.

Ameri *et al.* (2012) variaram o teor de emulsão asfáltica de misturas recicladas a frio e alcançaram os valores de massa específica, volume de vazios e estabilidade Marshall das amostras. O aumento no teor de emulsão ajuda no comportamento mecânico das misturas, porém, em determinado momento, esse acréscimo pode deixar as misturas mais frágeis, devido ao excesso de fluido (ligante asfáltico + água) incorporado, gerando as vezes um maior volume de vazios após a cura.

## 2.2 RECICLAGEM NA PAVIMENTAÇÃO

A reciclagem dos pavimentos, segundo o DNIT (BRASIL, 2006), é apresentada como uma solução de problemas, oferecendo inúmeras vantagens na sua utilização, se comparada aos materiais virgens. Entre os benefícios, cita-se a conservação de agregados, ligantes e energia, a preservação ambiental, e por fim, a restauração das condições geométricas existentes.



De acordo com Bernucci *et al.* (2008), a reciclagem é realizada após uma avaliação funcional e estrutural do pavimento, e tem a intenção de retirar as camadas com potencial reflexão de trincas. Quando os pavimentos asfálticos despertam o processo de deterioração estrutural, têm-se a necessidade de restaurá-los. A reciclagem dos pavimentos, consiste no reaproveitamento dos materiais existentes, o qual pode ser realizado por meio da execução de novas camadas ou o corte total ou parcial do revestimento (CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015).

Conforme Ceratti, Bernucci e Soares (2015), o processo de reutilização de misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas para a produção de novas misturas asfálticas, utilizando os agregados e o ligante asfáltico proveniente da fresagem, é compreendido como reciclagem de revestimento. Material este que pode ser acrescido de insumos, como agregados, cimento asfáltico de petróleo (CAP) ou emulsão asfáltica (EAP), asfalto espuma ou, ainda, aglomerantes hidráulicos.

Na Suécia, os resíduos de asfalto de estradas estaduais, geralmente são reaproveitados com a finalidade de preservação dos recursos naturais. Entretanto, há lacunas que ainda não foram preenchidas em relação ao método de reciclagem de asfalto usado pelos municípios e empresas privadas, além da falta de conhecimento das práticas ambientais e do ciclo de vida deste material (MILIUTENKO; BJÖRKLUND; CARLSSON, 2013).

De acordo com Costa e Filho (2010), o reaproveitamento dos materiais existentes no pavimento antigo como principal meio para construir novos pavimentos, pode trazer inúmeros benefícios, sendo um deles, evitar a exploração em excesso das jazidas. Além disso, citam-se ainda outros pontos positivos de empregar a técnica da reciclagem: conservação do greide da pista evitando problemas com o não aparecimento de degraus nos acostamentos oriundos das diversas camadas de recapeamento; qualidade e resistência do pavimento reciclado; redução no prazo de execução da obra e menor tempo de interrupção de tráfego durante o trabalho; novo ponto de vista sobre a recuperação asfáltica; às vezes até abre a possibilidade de redução de espessuras do revestimento sem perder a qualidade; e permite a redução de custos.

Com a reciclagem realizada, os benefícios ambientais e econômicos tornam impensável não reutilizar o RAP em um mundo onde o desenvolvimento de um material durável e benéfico é uma grande preocupação (KERKHOF, 2012). Segundo Pires *et al.* (2016), os métodos de reciclagem de pavimentos têm ganhado empatia

por parte dos órgãos de gestão e da sociedade, por se tratar de formas técnicas politicamente corretas e economicamente viáveis. Ainda, os autores relatam que a conscientização de empregar corretamente os recursos naturais, a necessidade da preservação ambiental e a redução das emissões de poluentes são os estimuladores da busca por alternativas ambientalmente favoráveis.

Em muitas jurisdições os fundos econômicos disponíveis não são capazes de acompanhar o aumento da manutenção preventiva e custos de preservação com o envelhecimento das rodovias. Isso traz uma redução significativa no estado e nível de serviço prestado, resultando em um aumento da manutenção preventiva geral e mais cara para reabilitação ou reconstrução (ARRA, 2001). A Figura 1 representa a condição do pavimento versus o tempo.

Estudos apontam que quando as rodovias são mantidas à elevado nível de serviço, custarão menos para a população em longo prazo. O Banco Mundial indicou um estudo de que cada U\$ 1,00 aplicado na queda de 40% na qualidade das rodovias, resulta em uma economia de U\$ 3,00 a U\$ 4,00 em comparação com as despesas necessárias nos 80% de queda na qualidade da rodovia (ARRA, 2001).

A reciclagem reaproveita recursos não renováveis, portanto, mesmo que o custo da reciclagem seja igual ao custo dos reparos convencionais, em alguns casos, se a sobreposição se limita à manutenção de passagens inferiores, a reciclagem é uma escolha melhor do que os reparos convencionais (KANDHAL; MALLICK, 1997). Reutilizar os agregados do pavimento degradado para os serviços de reconstrução, é uma prática que oferece uma redução da demanda por novos materiais e das distâncias de transportes, ampliando o tempo de exploração das ocorrências existentes. Isso é benéfico devido as leis de proteção ao meio ambiente e pela crescente valorização dos sítios de ocorrências de jazidas (BRASIL, 2006).

Em relação ao ligante asfáltico, há também uma vantagem importante através da reciclagem. Reaproveitar o asfalto envelhecido pode reduzir a quantidade de asfalto novo para restaurar um pavimento. Reutilizando os materiais de um revestimento de concreto asfáltico, será necessário cerca de 1 a 3% de adição de asfalto, já uma mistura com materiais virgens necessitará cerca de 6% de asfalto. Além disso, a reciclagem permite a conservação ou modificação das condições geométricas da pista. Em rodovias de múltiplas faixas, a reciclagem pode ser executada somente na faixa deteriorada, evitando o recapeamento em toda a largura

da pista de rolamento, os desníveis e garantindo uma drenagem adequada (BRASIL, 2006).

A fresagem, quando norteada à restauração de pavimentos, originou-se de dois tipos de equipamentos e processos específicos, denominados “*cold milling machine*”, que realiza o corte da estrutura por abrasão, e processo a quente, que utiliza o pré-aquecimento da estrutura, facilitando assim os cortes. Desse modo, a fresagem em pavimentos pode ser realizada quanto à temperatura de ocorrência, a frio ou a quente (BONFIM, 2011).

Isto posto, Bernucci *et al.* (2022), esclarecem que a reciclagem dos pavimentos pode ser efetuada a quente, utilizando o CAP, agente rejuvenescedor (AR) e agregados fresados aquecidos. Também pode ser a frio, utilizando EAP, agente rejuvenescedor emulsionado (ARE) e agregados fresados à temperatura ambiente. A classificação preponderante, é proposta pela ARRA (2001), que divide as técnicas de reciclagem em cinco grupos:

- a) *Cold planing* ou *milling* (CP): recomposição do revestimento;
- b) *Hot recycling* (HR): reciclagem a quente, na usina;
- c) *Hot in-place recycling* (HIR): reciclagem a quente, *in situ*;
- d) *Full depth reclamation* (FDR): reciclagem profunda;
- e) *Cold recycling*
  - *Cold central plant recycling* (CCPR): reciclagem a frio, em usina;
  - *Cold in-place recycling* (CIR): reciclagem a frio, *in situ*.

Moreira e Pereira (2007) ressaltam que a fresagem por meio de incorporação de algum tipo de ligante (cimento, cal, emulsão, betume), água (hidrata e realiza a mistura e compactação), utilização de novos agregados (regularização granulométrica) e aditivos, deve ser dosada através de ensaios parametrizados, para que o material danificado da rodovia seja reutilizado. Essa mistura homogeneizada de materiais é espalhada, compactada e exposta à cura, formando uma nova camada de pavimentos.

Contudo, a reciclagem de pavimentos não é uma técnica recentemente empregada de renovação de pavimentos, mas precisa ser aperfeiçoada cada vez mais e economicamente justificada, através de constantes processos avançados e novas tecnologias. Além disso, em qualquer caso de reciclagem de pavimentos, é imprescindível que seja realizado um estudo em laboratório, preferencialmente seguido de um traço experimental que demonstre resultados válidos, para que sejam

escolhidas as melhores opções para a reabilitação de pavimentos (MOREIRA; PEREIRA, 2007).

### 2.2.1 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Conforme Giani *et al.* (2015), o RAP aliado a produção de mistura asfáltica a quente é um aspecto imprescindível para um projeto sustentável de pavimentos asfálticos por propiciar melhorias. Essa técnica reduz as emissões de dióxido de carbono em 12% enquanto a energia e o consumo de água diminuiriam em 15% cada um, ao longo do ciclo de vida de uma rodovia. Em contrapartida, a aplicação de reciclagem a frio *in loco* significa reduzir o uso de agregados e os transportes dos materiais, e isso traz benefícios em termos de equivalência em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>eq) emitido, reduzindo 9% em todo o ciclo de vida e 54% considerando apenas a fase de reciclagem.

Não há muitos problemas técnicos no uso do RAP para baixas taxas de reciclagem ( $\leq 20\%$ ). Entretanto, ao buscar níveis mais elevados de reutilização, acima de 50%, por exemplo, é de extrema importância um bom controle e gerenciamento dos produtos, para garantir a conformidade da produção do material (KERKHOF, 2012). De acordo com Kandhal e Mallick (1997), reutilizar o material fresado pode proporcionar uma economia de 40% a 50% em relação aos métodos convencionais. Todavia, o processo deve ser eficiente e o material deve possuir qualidade significativa, o que acentua o fato de que a escolha equipamento a ser utilizado deve ser feita cuidadosamente.

A *Federal Highway Administration* (FHWA) é uma agência do departamento de transportes dos Estados Unidos que apoia os governos locais e estaduais no projeto, construção e manutenção do sistema rodoviário, prestando assistência financeira e técnica. Para que o emprego de RAP seja bem sucedido em qualquer situação, devem existir pelo menos três requisitos essenciais: rentabilidade, ser ambientalmente responsável e ter um bom desempenho em campo (FHWA, 2011).

De acordo com a *European Asphalt Pavement Association* (EAPA, 2017), na Europa, há 50 milhões de toneladas de RAP disponíveis por ano, sendo que 57% são utilizados. A utilização mais comum para o RAP é a produção de novas misturas asfálticas. Seu uso cresceu amplamente nos últimos 25 anos, com teores de RAP de 10% a 90%, podendo chegar a 100% em alguns casos.

Em uma revisão detalhada da literatura referente ao RAP, efetuada por Devulapalli, Kothandaraman e Sarang (2019), constatou-se que este material é muito vantajoso no quesito de respeito ao meio ambiente e sustentabilidade, porém, os benefícios de utilização devem ser investigados. A mistura entre o RAP e os materiais virgens é crucial no contexto de desempenho e durabilidade das misturas. Embora os rejuvenescedores sejam um aditivo que pode atuar como catalisador e melhorar a propriedades do ligante envelhecido, vários aspectos devem ser destacados para as misturas RAP, incluindo o projeto da mistura, materiais constituintes, desempenho, utilização de ligante asfáltico modificado com polímero, além de inúmeros benefícios ambientais.

### **2.2.2 Pesquisas com a utilização de material fresado e cimento**

Taha *et al.* (2002) efetuaram a avaliação laboratorial do material fresado e agregados virgens estabilizados com cimento. Esta se baseou no experimento para diferentes proporções de misturas de fresado/agregado virgem, divididos da seguinte forma: 100/0; 90/10; 80/20; 70/30 e 0/100%. A partir dessa determinação, as amostras possuíam 0, 3, 5 e 7% de cimento Portland CP – I e o tempo de cura definiu-se em 3, 7 e 28 dias para os ensaios de RCS e MR. Constatou-se que não é recomendado utilizar os 100% de fresado puro para a camada de base, exceto se for adicionado o cimento. Contudo, as misturas de fresado e agregados virgens estabilizados com cimento provaram ser uma boa opção na construção de bases de pavimentos.

Dellabianca (2004) ensaiou o cascalho laterítico e o material fresado, com e sem adição de cal hidratada e cimento (CP II – F), empregando o teor de 2% para ambos. Definiu-se trabalhar com porcentagens de 16%, 20%, 25% e 35% de fresado adicionado à mistura reciclada e com a energia de Proctor intermediária em todas as compactações e as amostras foram submetidas aos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC), compressão simples, cisalhamento direto e módulo de resiliência. Os resultados de ISC comprovaram que a estabilização química com cimento e cal gerou melhorias significativas no valor máximo em relação à mistura cascalho/fresado isoladamente.

Na compressão simples, Dellabianca (2004) definiu um teor ótimo de fresado (25%), no qual a mistura ganha uma resistência máxima, em relação ao RCS do cascalho puro. Outro fator preponderante, foi a película formada pelo ligante, que

envolve os grãos do material fresado e afeta as propriedades da mistura, sendo assim, reduz o ângulo de atrito interno, aumenta o repique elástico durante o ensaio de compactação e proporciona ao fresado uma deformação viscosa, diminuindo o ISC, RCS e MR.

Ao analisar as misturas asfálticas contendo 30% de revestimento asfáltico fresado e 70% de base de solo-cimento, Paiva e Oliveira (2010) realizaram a estabilização química com 3% de cimento Portland CP – IIE32. Em suma, os resultados encontrados para RCS e RT foram de 2,47 MPa e 0,22 MPa, respectivamente, utilizando a energia modificada de Proctor para compactação, expostas à cura de 7 dias. Esses valores representam que, mesmo com percentuais baixos de cimento, é possível obter valores satisfatórios com boas resistências nessas misturas.

Diversas misturas foram estudadas por Isola *et al.* (2013), estas foram nomeadas da seguinte forma: CTBREF (70% agregado miúdo + 30% agregado graúdo), CTBR30 (50% agregado miúdo + 20% agregado graúdo + 30% RAP) e a CTBR70 (10% agregado miúdo + 20% agregado graúdo + 70% RAP). Os resultados demonstraram que o valor de RCS aos 7 dias de cura atingiu 3 MPa, atendendo a resistência mínima exigida pelo padrão italiano:  $2,5\text{MPa} \leq \text{RCS} \leq 4,5\text{MPa}$  e  $\text{RT} > 0,25\text{MPa}$ . As porcentagens de cimento foram de 3,56% (CTBR30), 3,97% (CTBR70) e 2,9% (CTBREF), sendo esse percentual relacionado com o peso de agregados secos.

Corrêa *et al.* (2014) estudaram a reutilização dos resíduos de fresagem como alternativa técnica economicamente viável em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviárias, por meio de misturas de solo com cimento e cal. Para isso, foi misturado ao solo um material fresado provindo da rodovia BR-222 de um trecho do Ceará, nas proporções de 0%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% e 45% em relação ao peso do solo, adotando um teor fixo para o RAP de 40% para adição de estabilizante químico (cal e cimento) nos teores de 2%, 3%, 4% e 5%.

Dentro das proporções analisadas, concluiu-se que, ao adicionar o RAP ao solo de jazida na proporção de 60%SOLO+40%RAP, a maior capacidade de suporte foi da mistura com ISC igual a 48%. Já nas misturas com cal (SOLO+RAP+CAL), houve diminuição do ISC constatando-se a inviabilidade da utilização da cal com a mistura SOLO+RAP nas camadas de base, por apresentar valores inferiores ao valor do ISC do solo de jazida. No geral, a adição do cimento Portland foi a que apresentou os melhores resultados com ganho significativo nos valores de ISC, variando de 127%

a 173%, mostrando-se compatível com a especificação do DNIT para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários (CORRÊA *et al.*, 2014).

Lin *et al.* (2015), estudaram as misturas do tipo *Cold Recycled Mixture by Emulsion and Cement* (CRME), conhecida como mistura reciclada a frio por emulsão e cimento. Para a execução, projetou-se um teor de cimento de 2% para as amostras convencionais de CRME e o teor de emulsão asfáltica ideal foi determinada como 3,8%, ressaltando que a emulsão catiônica lenta foi preparada com ligante e emulsificante em laboratório. Além disso, o RAP foi obtido de uma via da Província de Jiangxi, no sudeste da China.

Os resultados indicaram que o cimento desempenha papel fundamental na resistência desse tipo de mistura nos primeiros três dias, e a emulsão asfáltica desempenha o papel predominante na força inicial e final. Em relação ao processo de cura das misturas, ficou evidente que, embora o reciclado a frio com emulsão e cimento tenha sido positivo, existem alguns problemas oriundos desta tecnologia, o que restringe a sua inserção. Por exemplo, ele necessita de 3 a 7 dias de cura no verão e ainda mais tempo no inverno devido à baixa intensidade, que prolonga o período da construção inviabilizando a organização do tráfego em campo (LIN *et al.*, 2015).

Com a utilização de material fresado (entre 8% e 92%) e cimento (entre 1% e 7%), Kleinert (2016) estudou as misturas compactadas sob a energia modificada de Proctor. Variou-se o tempo de cura em relação ao ensaio, sendo de 3, 7 e 14 dias para ensaios de comportamento mecânico e para os demais ensaios fixou-se em 7 dias. Observou-se que o teor de cimento foi a variável que demonstrou o maior efeito perante as demais, melhorando consideravelmente o comportamento das misturas. Para a RCS foram encontrados valores elevados entre 1 MPa e 6,49 MPa, já para a RT, os valores ficaram entre 0,17 MPa e 1,22 MPa e para a rigidez das misturas, houve uma variação nos resultados de 484 MPa à 20.031 MPa.

Pasche (2016) analisou alguns parâmetros das misturas aos 28 dias de cura, sendo eles: RCS, RT módulo de resiliência e o módulo complexo. Os ensaios foram realizados com 70% de material fresado e 30% de pó de pedra (estabilização granulométrica), efetuando-se a estabilização química com o cimento Portland CP – V ARI nos teores de 3%, 5% e 7%. O autor concluiu que nos três teores estudados houve um aumento da resistência à compressão simples e à tração por compressão

diametral, bem como o aumento dos módulos de forma linear ao aumento da quantidade de cimento.

Tanski (2016) preparou as amostras com uma matriz pétreo fixa de 70% RAP e 30% pó de pedra, com teores de cimento de 0% e 1%, articulando com emulsão asfáltica nos teores de 2%, 3%, 4% e 5% em massa total, totalizando oito misturas. Contudo, o aumento dos teores de emulsão não proporcionou aumento de rigidez às misturas, além de prejudicar a resistência ao dano, quando comparado com as misturas sem e com cimento. De forma geral, a mistura 2% 1% (2% de emulsão e 1% de cimento) na qual a relação cimento/emulsão, em massa, não excedeu 62,5%, demonstrou um potencial de utilização de mistura reciclada como camada de base ou até mesmo sub-base de pavimento.

Anteriormente, Specht *et al.* (2013) encontrou a viabilidade de aplicação para base de pavimentos, utilizando através de ensaios laboratoriais de resistência, uma mistura de 70% de material fresado, 30% de agregados naturais (divididos em brita 3/4" e pó de pedra) e 5% de cimento Portland. Além disso, a proporção 70/30 (fresado/material virgem) apresentou de forma satisfatória a questão técnica e econômica atribuindo-se na faixa A do DNIT.

A avaliação mecânica, segundo Pires (2014), representou bons resultados ao desenvolver uma mistura com agregados virgens, aumentando a capacidade de suporte do material. Ensaio de compactação e ISC realizados no fresado puro e mistura elaborada com 70% de fresado + 30% agregado virgem, demonstraram que estabilizar granulometricamente ocasiona crescimento de desempenho em relação ao material fresado estabilizado mecanicamente.

No estudo de Pires *et al.* (2016), o material fresado estabilizado mecanicamente apresentou CBR de 56%, enquanto o material fresado estabilizado granulometricamente chegou a 95%, que são valores compatíveis com materiais granulares utilizados em camadas de pavimento. Na estabilização química, o teor de cimento que atendeu os requisitos foi no entorno de 5%, porém, segundo os autores, dependendo da obra e da matriz de custo, pode não ser a opção mais interessante.

Klamt *et al.* (2018), estudou a viabilidade da utilização de material fresado em camadas de base de pavimentos, destacando as melhorias químicas que ocorreram, sem que falhasse as suas características mecânicas. Neste estudo, incorporaram-se aglomerantes como o cimento Portland pozolânico CP – IV e a cal hidratada dolomítica CH-II, com adições minerais de sílica de casca de arroz e cinza volante. Obteve-se



como melhor alternativa às adições químicas e elevação na resistência, a mistura composta por 80% de material fresado, 20% de pó de pedra, 5% de sílica de casca de arroz e 5% de cimento. Essa mistura resultou em uma resistência a tração por compressão diametral superior a 1,15 MPa. Portanto, essa mistura é a de melhor desempenho técnico e ambiental, reutilizando resíduos da própria pavimentação e da produção do arroz.

A preparação de misturas compostas por uma matriz pétreo reciclada com 70% fresado e 30% pó de pedra e uma matriz pétreo de referência (contendo 61,5% de pó de pedra, 22,5% de brita 3/8" e 16% de brita 3/4") foi efetuada por Silva (2018). Houve também o emprego de cimento Portland CP – V ARI em 4%, 5% e 6% em relação a massa da mistura, com tempos de cura de 7 e 28 dias, sob compactação Proctor na energia normal, intermediária e modificada. O autor avaliou a influência dos teores de cimento e variações da massa específica aparente seca nas propriedades mecânicas das misturas.

Os resultados da pesquisa de Silva (2018) demonstram que, no ensaio de RCS aos 7 dias de cura, foram obtidos valores de 1,84 MPa para 4% de cimento com densidade de 1,90 e de 5,36 MPa para 6% de cimento com densidade de 2,10. Para o ensaio de RT foram encontrados valores entre 0,21 MPa (4% de cimento) e 0,80 MPa (6% de cimento). Por fim, o MR resultou em 4.800 MPa (4% de cimento) e 11.100 MPa (6% de cimento). Esses resultados são referentes à média de três CPs e as densidades correspondem à 1,90 (energia normal) e 2,10 (energia modificada), para uma cura de 7 dias. Ressalta-se que o autor aplicou os ensaios também para períodos mais longos, evidenciando assim o aumento da resistência nos CPs devido ao tempo de cura.

Mullapudi, Karanam e Kusam (2019) verificaram que a utilização de ligantes RAP em misturas asfálticas na construção da camada de asfalto emergiu como uma importante opção de reabilitação para pavimentos de asfalto. O efeito da composição química do asfalto virgem e RAP no módulo de resiliência (MR) das misturas foram avaliados, testando as diferentes misturas preparadas com amostras de betume contendo diferentes proporções de ligante, apresentando aumento da rigidez e da viscosidade.

Além disso, Mullapudi, Karanam e Kusam (2019) também pesquisaram a relação entre os índices químicos e os parâmetros reológicos, tendo boa correlação com os módulos resilientes das misturas. As características mecânicas trazem

impactos positivos com a utilização de fresado, além de minimizar o emprego de recursos naturais em camadas de base de pavimento e evitar a disposição incorreta dos fresados, da mesma forma que a sílica da casca de arroz e da cinza volante, materiais que causam impactos negativos ao meio ambiente.

Rolim (2020), utilizou uma matriz de 70% fresado e 30% pó de pedra e uma matriz de referência com 48,5% de pó de pedra, 41% de brita 3/8" e 10,5% de brita 3/4", enquadrando-as na faixa C do DNIT – ES 141 (DNIT, 2010a). A avaliação foi realizada a partir dos percentuais de cal (3 e 6%) e cimento (4 e 5%) contidos em cada mistura e suas variações de massa específica aparente seca, propriedades mecânicas e a relação de porosidade teor volumétrico de material cimentante  $\eta/Ci\%$ . Em relação a RCS, em baixos teores de materiais cimentante, os resultados já demonstraram um ganho de resistência, seja pela presença do cimento ou pela participação da cal para um período de 7 dias. Esse período, segundo o autor, é considerado curto quando se utiliza o cimento CP – IV. Para o ensaio de RT os valores foram coerentes ao se comparar o tempo de cura de 7 e 91 dias, chegando a um acréscimo de 60,9% aos 91 dias no traço de 4% de cimento e 3% de cal.

### 2.3 EMULSÃO ASFÁLTICA

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2012), a emulsão asfáltica para pavimentação é um produto constituído pela dispersão coloidal de uma fase asfáltica (cimento asfáltico) em fase aquosa através de um agente emulsificante e é utilizada em serviços de pavimentação. De acordo com Bernucci *et al.* (2022), a emulsão asfáltica é definida como uma dispersão estável de dois ou mais líquidos imiscíveis, neste contexto, água e asfalto, contendo de 50 a 70% de CAP. O agente emulsionante ou emulsificante é uma substância que reduz a tensão superficial. A forma de uso da emulsão consiste em provocar ruptura ou quebra do equilíbrio frágil da mistura óleo-água, deixando os glóbulos livres para se reunirem, resultando na reconstituição do asfalto residual, que deve ser igual ao original antes da emulsificação.

Emulsões padrão de asfalto (betume) são líquidos considerados como óleo em água, produzido por água (25-60%), betume (40-75%), emulsificante (0,1-2,5%) e aplicação de energia mecânica suficiente para o betume em gotículas. A emulsão betuminosa pode ser classificada devido às gotículas carregadas, pH e reatividade

em catiônicos, aniônico e tipos não iônicos com vários graus de configuração, incluindo configuração lenta, ajuste médio e ajuste rápido (BAGHINI *et al.*, 2017).

A obtenção das emulsões ocorre da fusão da água com o asfalto aquecido, em um meio agitado e na presença de agentes emulsificantes, que têm a finalidade de proporcionar estabilidade à mistura, favorecendo a dispersão e revestindo os glóbulos de betume com uma película protetora (TORRES, 2013). Ao contrário dos asfaltos diluídos, as emulsões são de uso progressivo mundialmente. O seu manuseio e aplicação tem menor índice de poluição para o meio ambiente e queda do consumo de energia. Além disso, as emulsões asfálticas são os ligantes mais utilizados para uso em tratamentos superficiais (LOIOLA, 2009).

A maioria dos fabricantes produz todas as classes de emulsão, entretanto, as emulsões de mesma classe confeccionadas por diferentes fabricantes podem reagir de diferentes maneiras. Portanto, é importante que a emulsão usada em campo seja idêntica à usada no programa de testes em laboratório. Cabe analisar também o caso e a taxa de aplicação através de testes laboratoriais. As taxas de aplicação variam de 2% a 3% (em massa) de ligante residual e podem ser usadas taxas mais baixas em cerca de 0,5% a 1% com satisfatoriedade em climas mais secos (AUSTROADS, 2006).

Leite (1999) ressalta que as emulsões asfálticas são constituídas por pequenas partículas ou glóbulos de CAP suspensas em água contendo elemento emulsificante. Quando se aplicam as emulsões, as partículas de CAP se depositam sobre as pedras (agregados minerais), causando a ruptura da emulsão e separam-se da água. No Brasil, são utilizadas emulsões asfálticas catiônicas, que podem ser de ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) e ruptura lenta (RL).

Nas emulsões catiônicas, segundo Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (ABEDA, 2010), o sinal de ruptura se dá pela reação química de atração eletrostática entre o emulsificante e o agregado. O tempo de cura e ruptura das emulsões durante a aplicação dependerá da técnica e dos materiais adotados, assim como das condições ambientais a quais forem expostas. O sinal de ruptura ocorre pela mudança de cor da emulsão, o que difere é que, nas emulsões aniônicas e não iônicas a ruptura ocorre pela evaporação da água.

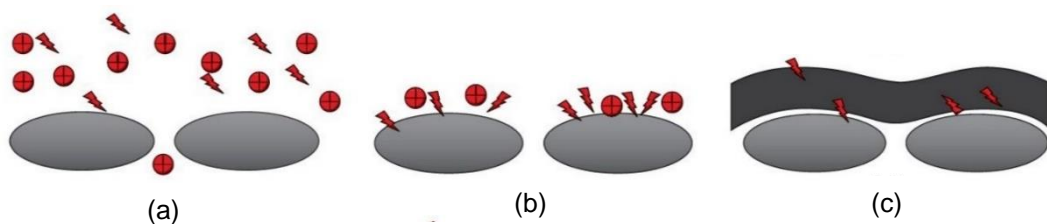
No processo de emulsificação, é necessário que ocorra a quebra do CAP em partículas micrométricas e que ele se disperse no meio aquoso. Para viabilizar este cisalhamento do CAP, aplica-se uma energia térmica e mecânica, por meio de moinho

coloidal, obtendo-se uma emulsão de asfalto em água. Jacintho (2010) descreve o emulsificante como um importante elemento que, em concordância com suas propriedades químicas e estrutura molecular, gera emulsões de características físico-químicas particulares, pois produz a redução da tensão interfacial entre duas fases (asfalto e água) e, ainda, estabiliza a emulsão, fixando-se na periferia dos glóbulos dispersos de asfalto, impedindo, de tal forma, sua aglomeração, o que promoveria a ruptura da emulsão.

As emulsões asfálticas são definidas pelo DNIT 165/2013 – EM (DNIT, 2013) como um sistema constituído pela dispersão de uma fase asfáltica em fase aquosa, com características predefinidas. Esse material é classificado pelos seguintes códigos: RR, RM, RC e RL que significam respectivamente, ruptura rápida, ruptura média, ruptura controlada e ruptura lenta. As emulsões asfálticas para o serviço de imprimação (EAI), de ruptura lenta catiônica (LA) e de carga neutra (LAN) para o serviço de lama asfáltica. Por fim, a emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada (LARC), para o serviço de lama asfáltica.

A Figura 1 representa esquematicamente, o efeito de ruptura de emulsão catiônica ao entrar em contato com o agregado.

Figura 1 – Esquema de ruptura das emulsões asfálticas catiônicas



Fonte: Adaptado de ABEDA (2010, p. 51).

Verifica-se que, inicialmente, a emulsão entra em contato com o agregado (Figura 3a), em seguida há a adsorção do agente emulsificante livre e atração das películas de asfalto (Figura 3b) e, por fim, forma-se o filme de asfalto sobre o agregado (Figura 3c). O tempo de ruptura e cura das emulsões asfálticas durante sua aplicação depende da técnica empregada e dos materiais utilizados, bem como das condições ambientais às quais é exposta. O emulsificante em contato com a superfície do agregado reage quimicamente, promovendo a adesividade satisfatória do asfalto residual da emulsão, com quase todos os tipos de agregados (ABEDA, 2010).

Na Austrália, as emulsões asfálticas são fabricadas conforme o padrão australiano (AS1160), que permite duas classes dependendo da carga das partículas: emulsão betuminosa aniônica, onde as partículas de betume são carregadas negativamente e emulsão betuminosa catiônica, onde as partículas de betume são carregadas positivamente. Ambas as classes são divididas em pega rápida e lenta (AUSTROADS, 2006).

Preeminentemente, as emulsões asfálticas utilizadas para pavimentação brasileira são do tipo catiônica, especificamente dentro da classe RL-1C. A velocidade de ruptura da emulsão é escolhida de acordo com a superfície específica e características químicas do solo, sendo recomendadas de acordo com suas respectivas rupturas, média e lenta, sendo a lenta mais utilizada (JACINTHO, 2010; ABEDA, 2010). A emulsão a ser empregada na reciclagem pode ser RM ou RL, ou ainda uma emulsão preparada especificamente para a reciclagem.

Em conformidade com Jorge (2014), a escolha do tipo da emulsão asfáltica tem referência à quantidade existente de pó no agregado da mistura. Habitualmente, é adotada a RL quando a quantidade de pó no agregado for maior, pois precisa de tempo para que a emulsão envolva os agregados por completo na mistura reciclada. O autor destaca que já existem emulsões sendo produzidas especialmente para cada mistura reciclada, dando importância às características dos agregados.

Outro aspecto importante, é a atenção que se deve ter com esse material e, no Brasil, conforme a norma DNIT 165/2013 – EM (DNIT, 2013), há alguns cuidados de inspeção e amostragem que devem ser tomados ao receber a emulsão asfáltica. É relevante verificar se a quantidade fornecida e o tipo de emulsão correspondem ao estabelecido; coletar amostra em conformidade com a Norma NBR 14883 (ABNT, 2021) e remetê-la identificada e autenticada a um laboratório para os ensaios de recebimento; por fim, rejeitar a parte do fornecimento que se apresente em mau estado de acondicionamento.

### **2.3.1 Pesquisas empregando emulsões asfálticas e cimento**

Em pesquisa realizada por Du (2014), no exterior, o principal método do projeto de mistura referiu-se em selecionar o teor ideal de emulsão asfáltica para uma determinada concentração de cimento. Neste estudo, o teor de emulsão variou de 2% a 5% e, em cada teor empregado, as concentrações de cimento foram 0%, 1%, 5%,

2,5% e 3%. Conforme as conclusões obtidas pelo autor, neste caso, quanto maior o teor de cimento incorporado, menor era o teor de emulsão a ser empregado, o que se justifica devido à capacidade desses produtos em aumentarem a rigidez e a adesão da interface do agregado com o ligante.

Na Malásia, foram investigados os efeitos da adição de uma emulsão betuminosa e cimento Portland no desempenho a longo prazo da base rodoviária. As amostras se estabilizaram com cimento Portland Tipo II, com teores entre 0 – 6% e betume emulsão (0 – 6%), que é um estabilizador utilizado líquido a base de água (BAGHINI; ISMAIL; KARIM, 2015). Como conclusão, os autores recomendam o uso de 4% de cimento e 3% de emulsão para emprego na camada de base do pavimento.

Rosa *et al.* (2015) estudaram a utilização de uma emulsão asfáltica produzida por uma empresa nacional como ligante asfáltico e o cimento CP – IV como ligante hidráulico, com isso, verificaram qual mistura apresentou o melhor comportamento. As misturas foram denominadas das seguintes formas: Fresado + 3% Emulsão, Fresado + 3% Emulsão + 3,5% Cimento e, por fim, Fresado + 3,5% Cimento. A dosagem dos teores ideais de emulsão asfáltica na mistura reciclada foi estabelecida pela metodologia Marshall e Proctor modificado.

A adição dos distintos tipos de ligante (asfáltico e hidráulico) promoveram comportamentos diferentes frente à resistência e deformabilidade. Um exemplo é a inserção de emulsão asfáltica, que resultou em um material menos suscetível a deformação permanente. Em contrapartida, a adição de cimento Portland proporcionou valores de resistência à tração elevados para os níveis de cimentação propostos no estudo (ROSA *et al.*, 2015).

Bessa *et al.* (2016) executaram uma avaliação nas diferentes metodologias utilizadas na concepção de misturas recicladas a frio com adição de emulsão asfáltica e cimento Portland. Foram aplicados diferentes teores de emulsão, cimento e água com a aplicação de diferentes métodos de compactação (Marshall e Proctor). O método Marshall (75 golpes por face) foi utilizado para produzir corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 63 mm de altura, e o método de Proctor foi utilizado para produzir amostras que não possuíam o tamanho de molde normal, mas sim amostras de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Esse processo foi feito para atender ao teste triaxial.

Além disso, incluiu-se a caracterização mecânica de mistura reciclada após variados processos de cura. Os teores de emulsão aplicados pelos autores foram de

2%, 3% e 4%, e os teores de cimento foram de 0%, 1% e 2%. As temperaturas no processo de cura foram de 25, 40, 60 e 100 °C e os períodos de tempo foram de 1, 3, 7, 28, 60 e 90 dias. Os materiais constituintes da mistura foram agregados RAP, emulsão asfáltica catiônica modificada com polímero (CRS-2P) e cimento Portland CP – II (BESSA *et al.*, 2016).

O objetivo principal do estudo de Bessa *et al.* (2016), foi apresentar uma metodologia correta a ser aplicada para esse tipo de mistura, de forma a contribuir para as misturas recicladas a frio e, ainda, incluir o método de compactação a ser aplicado e o processo para definição do conteúdo ideal de água, emulsão asfáltica e cimento a ser utilizada. Os autores destacam que a compactação Proctor é recomendada, parecendo a forma mais adequada para esse tipo de mistura.

Bessa *et al.* (2014) estudaram misturas recicladas a frio, produzidas com 100% de material fresado, através da metodologia de compactação Marshall. Foram produzidas misturas com teores de emulsão asfáltica (RR-2C-E, modificada por polímero) variando entre 2%, 3% e 4%, além de 1% de cimento (CP – II). Fixando o teor de 3% de emulsão, variou-se a quantidade de cimento em 0%, 1% e 2%, substituindo também por cal hidratada nas mesmas quantidades já mencionadas. A cura foi de 28 dias à temperatura ambiente. No âmbito geral, o aumento no teor da emulsão levou a uma leve queda nos valores de MR e um aumento nos valores de RT. A mistura com 3% de emulsão teve a menor perda de MR, enquanto que a mistura com 2% foi a mais resistente em relação ao RT. Na variação dos teores dos ligantes hidráulicos, não foram observadas diferença significativa.

Moghadam e Mollashahi (2017) buscaram desenvolver um projeto de mistura para reciclagem a frio com asfalto emulsionado, através da revisão de estudos interiores. Para tal, houve um estudo aprofundado de pesquisas anteriores, sugestão de um novo método de dosagem de mistura para reciclado a frio com base em testes de desempenho e investigação do efeito do RAP nas propriedades de resistência de misturas recicladas a frio.

Para esse projeto, Moghadam e Mollashahi (2017) empregaram a emulsão do tipo catiônica de cura média, devido à falta de acesso aos aniônicos e, além disso, também se utilizou o cimento Portland. O método de moldagem foi o de Marshall, aplicado como um método de compactação mais acessível e dois níveis de compactação (50 e 75 golpes). Os autores relatam que não foi possível chegar em um consenso sobre a cura das misturas recicladas, pois a maioria deles seguiu o seu

próprio processo. Para um método considerado simples e barato, é indicado a realização do teste de *Indirect Tensile Strength* (ITS) para determinar o projeto de mistura ideal.

A fim de examinar a influência da emulsão asfáltica nos parâmetros medidos das misturas *Mineral-Cement Emulsion Mixtures* (MCE), Kuzniewski e Skotnicki (2020) utilizaram quatro níveis de teor de emulsão, sendo eles: 2%, 5%, 8% e 11%. Nas misturas analisadas, empregou-se a emulsão do tipo C60B10 ZM / R, considerando que esta deve estar de acordo com os requisitos propostos pela especificação do Comitê Polonês de Padronização PN-EM 13808/2013, que descreve os requisitos para as características de desempenho de classe de emulsão betuminosa catiônica, adequadas para uso em manutenção de estradas, aeroportos e outras áreas pavimentadas.

Além disso, o tipo de asfalto em emulsão deve ser 50/70 ou 70/100 das unidades de penetração e, ainda, a emulsão deve exibir boa compatibilidade com o ligante. A análise foi realizada com o teor médio de cimento curado em 3%, em relação ao peso da mistura de emulsão mineral-cimento. Este conteúdo de cimento levou à ótimas propriedades das misturas. As composições foram marcadas como C3E2, C3E5, C3E8 e C'3E11 (KUZNIEWSKI; SKOTNICKI, 2020).

Antão *et al.* (2019) verificaram a influência da variação de frequência de carregamento e temperatura sobre a resposta mecânica de pavimento, com uma camada de base com material reciclado estabilizado. Para isso, as amostras com emulsão foram nomeadas de *Asphalt Emulsion Mixture* (AEM). Os autores elaboraram duas réplicas com 3% de emulsão catiônica (em relação à massa seca de agregados) de ruptura lenta com teor residual de 62,3%, o que resulta em um teor efetivo de ligante asfáltico de 1,9%. A porcentagem em massa de RAP aplicada foi de 98%, tendo sido adicionados 2% de cimento tipo II 32,5R. As amostras foram moldadas com 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura, utilizando o compactador Proctor com energia modificada e teor de umidade de 5,5%, sendo este valor a soma tanto da água adicionada na mistura quanto da água presente na emulsão asfáltica.

Para as misturas do tipo *Foamed Asphalt Mixture* (FAM), foi empregado um CAP 85/100, aplicando 3% de asfalto para espuma e 2,6% de água para espuma. O teor de RAP foi de 68%, cimento tipo II 32,5R e também 30% de pó de pedra para correção da curva granulométrica, tendo em vista que a espuma de asfalto dispersa preferencialmente pela fração fina dos agregados. Antão *et al.* (2019) destacam que



há uma diferença significativa entre considerar o comportamento mecânico da base construída com AEM ou FAM como sendo viscoelástico ou puramente elástico.

Du (2019) investigou, na China, as propriedades mecânicas e características da emulsão asfáltica como estabilizante, inserida no cimento tradicional, macadame estabilizado com cimento, do inglês *Cement Stabilized Macadam* (CSM), com o objetivo de reduzir as fissuras por contração. Neste estudo, averiguou-se o efeito do teor de emulsão sob o CSM, tendo sido selecionado o teor de cimento de 4%, 5% e 6% por peso dos agregados totais. Já o conteúdo de emulsão asfáltica empregado foi de 0%, 1,5%, 2,5%, 3,5% e 4,5% em peso total agregado. Após a definição dos teores de cimento e emulsão, adicionou-se água, variando de 4% a 6% com intervalos de 0,5%.

No estudo de Du (2019), o efeito positivo produzido pela emulsão é atribuído ao encapsulamento da pasta de cimento por um filme plástico. O seu efeito negativo é na tensão de contração de temperatura, porém, pode ser considerada insignificante. Portanto, com intuito de maximizar a resistência e minimizar a fissuração aparente das misturas CSM, se faz necessário ajustar os teores de emulsão em relação ao teor de cimento.

Na mistura asfáltica a quente, quanto maior a quantidade de asfalto, maior a coesão. Já nas misturas recicladas a frio esse fenômeno não ocorre, pois a emulsão necessita um mínimo de umidade para melhorar a sua distribuição na mistura reciclada. Em conclusão, o máximo nível de resistência à tração não ocorre na maior quantidade de emulsão. A *Western US Research Institute* também provou que a quantidade ótima do asfalto emulsionado, bem como as propriedades mecânicas da mistura, são uma função da umidade dos agregados e o tipo de asfalto emulsionado. Portanto, Moghadam e Mollashahi (2017) descrevem que é incorreto usar um nível constante de água na preparação da mistura e determinação da quantidade ótima de asfalto emulsionado.

Na pesquisa de Meneses, Savasini e Bernucci (2020) analisou-se, por meio de simulação computacional, os efeitos de gradientes de temperatura nas camadas de pavimentos asfálticos compostos por camada de base em mistura asfáltica reciclada a frio com emulsão asfáltica, a qual recebeu o nome de *Cold Recycled Asphalt Mixture* (CRAM). Para estabilizar a mistura, utilizou-se emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta, com percentual de ligante residual de 48,4%.

Meneses, Savasini e Bernucci (2020) fixaram um teor de emulsão de 4% para todos os CPs para se atingir um teor próximo de 2% de ligante residual, usualmente encontrado por outros autores (LIN; HONG; XIAO, 2017; GRAZIANI *et al.*, 2018). Adotou-se também 1% de cimento na composição da CRAM conforme limites estabelecidos para misturas recicladas estabilizadas por emulsão. O objetivo principal dos fileres ativos é aumentar a resistência inicial da mistura e melhorar a resistência, inclusive em condições saturadas (WIRTGEN, 2012).

De acordo com Kuchiishi *et al.* (2017), a porção de agregados miúdos do CRAM é responsável pela alteração dos resultados do ensaio de compressão simples e da resistência a tração, pois quanto maior o teor de finos, maiores são os resultados. Os autores não encontraram diferenças significativas nos resultados dos ensaios de módulo de resiliência devido aos agregados da mistura do CRAM.

Materiais estabilizados com cimento e asfalto, do inglês, *Cement-Bitumen Treated Material* (CBTM), são estabilizados com teor máximo de 3% de emulsão ou espuma e com teor de cimento entre 1 e 3%, geralmente adotando-se o teor de cimento a partir de 2%. O CBTM tem o comportamento mecânico influenciado pelo teor de cimento adotado e de estabilizante asfáltico utilizado, devido ao tipo de cobertura das partículas dos agregados, reduzindo a suscetibilidade ao trincamento e a rigidez estrutural geral da camada reciclada, podendo ainda destacar a dependência do tempo-temperatura e propensão ao dano por fadiga, como ocorre com um concreto asfáltico (CARDONE *et al.*, 2014; GODENZONI; GRAZIANI; PERRATON, 2016; DA SILVA, 2019).

### **2.3.2 Processos de cura para camadas estabilizadas quimicamente**

A norma atual da *American Association of State Highway and Transportation Officials* PP 86-20<sup>1</sup> (AASHTO, 2020) retrata a forma de cura para misturas recicladas a frio emulsionadas. Esta norma descreve que após extrair as amostras dos moldes compactados, remover cuidadosamente o filtro de papel da parte superior e inferior das amostras manuseando as amostras com cuidado, a sua cura deve ser realizada em estufa, à  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  ( $140 \pm 2^\circ\text{F}$ ), com ventilação na parte superior.

Ainda, recomenda-se que a quantidade de perda de material das amostras também deve ser contabilizada (AASHTO, 2020). Além disso, as amostras devem ser curadas até a massa constante, mas não devem permanecer por mais de 48 h, nem

por tempo inferior a 16 h. A massa constante é definida como 0,05% de mudança na massa ou menos de 2 h. Após a cura, as amostras são resfriadas a  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$  ( $77 \pm 4^{\circ}\text{F}$ ) por no mínimo 12 h e, no máximo 24 h. A Tabela 6 demonstra algumas pesquisas nacionais e internacionais com a utilização de emulsão asfáltica, com as formas de cura das amostras e seus respectivos percentuais de cimento.

Tabela 6 – Pesquisas realizadas nacional e internacionalmente com as formas de cura adotadas

<b>Autores</b>	<b>Temperatura e tempo de cura</b>	<b>Percentual de cimento (%)</b>	<b>Percentual de emulsão (%)</b>
Kavussi e Modarres (2010)	25°C – 7, 28 e 120 dias	2,00	4,00
Bessa <i>et al.</i> (2014)	25°C – 28 dias	0,00; 1,00 e 2,00	2,00; 3,00 e 4,00
Yan <i>et al.</i> (2014)	25°C 12h + 60°C 48h	1,50	3,50
Arimilli, Jain e Nagabhushana (2016)	40°C – 3 dias = Campo por 30 dias	1,00	3,00
Tanski (2016)	60°C – 24h iniciais	0,00 e 1,00	2,00; 3,00; 4,00 e 5,00
Lin <i>et al.</i> (2018)	20°C – 7 dias	1,00	3,80

Fonte: Autora.

O descrito pela norma do DNER – ME 107 (DNER, 1994c) para mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall, é que, após a execução das amostras compactadas, os corpos de prova com o molde devem ser colocados em estufas a 60°C por 24 h. Após esse período retira-se da estufa e deixa-se resfriar à temperatura ambiente por cerca de 2 h, no mínimo. Na sequência, deve-se extrair o corpo de prova do molde colocando-o sobre uma superfície limpa, plana e lisa, cuidando com o manuseio para evitar fratura ou deformação da amostra.

ARRA (2018) demonstra algumas diretrizes frente à cura de amostras utilizando a emulsão asfáltica. Sendo assim o recomendado é que as mesmas sejam curadas em estufa com ventilação nas laterais e topo, com temperatura de 60°C para massa constante, e essa cura não pode ser superior que 48 horas. Ainda assim, o procedimento deve ser realizado respeitando as alturas das amostras, determinadas de acordo com a AASHTO T245 (ASTM 6927), ou obtidas no compactador giratório Superpave.

Já a norma brasileira NBR 5738 (ABNT, 2016b) que versa acerca da parte cimentada – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, descreve que, durante as primeiras 24 horas após a moldagem, a cura é garantida utilizando-se uma membrana plástica que cubra a superfície do corpo de prova. Após esse período, os corpos de prova são desmoldados, identificados e submetidos à cura úmida até o momento do ensaio, sendo acondicionados em câmara úmida na mesma faixa de temperatura e umidade relativa do ar superior a 95%. Os corpos de prova devem ficar protegidos de gotejamentos e não devem ficar à ação da água em movimento.

No setor de pavimentação do Brasil há certa predominância em optar pela emulsão asfáltica do tipo catiônica. Entretanto, a emulsão utilizada foi a emulsão de ruptura lenta e catiônica. Tanski (2016) realizou uma caracterização comumente empregada para emulsão catiônica de ruptura lenta (RL – 1C), a qual compunha os seguintes ensaios de laboratório: resíduos por evaporação (%) – EL 210/01 (DAER-RS, 2001a); viscosidade Saybolt-Furol 25°C e 50°C (s) – EL 202/01 (DAER-RS, 2001b); e peneiramento (%) – EL 207/01 (DAER-RS, 2001c).

Rezende *et al.* (2018) estudaram a aplicação de uma emulsão de ruptura rápida RR – 1C como ligante asfáltico, substituindo as emulsões de RL e RM tradicionalmente utilizadas em pré-misturados a frio. Para a caracterização desta, foi necessário realizar alguns ensaios básicos, tais como: ensaio de viscosidade Saybolt Furol de emulsões asfálticas – NBR 14491 (ABNT, 2007a); densidade e Massas específicas pelo uso de picnômetro DNER-ME 193 (2006) – Materiais Betuminosos Líquidos e Semissólidos; e ensaio de resíduo por evaporação conforme a NBR 14376 (ABNT, 2019).

Internacionalmente, as emulsões asfálticas catiônicas de ruptura lenta devem estar em conformidade com os requisitos prescritos pelas normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D 244 (ASTM, 2009) e D 2397 (ASTM, 2005). As propriedades verificadas se referem à viscosidade Saybolt Furol em 25°C, teste de estabilidade de armazenamento (%), teste de carga de partícula, teste de peneira (%), teste de mistura de cimento (%), destilado de óleo por volume de emulsão (%), resíduo de destilação (%), penetração à 25°C, solubilidade em tricloroetileno (%) e quantidade de água (BAGHINI; ISMAIL; KARIM, 2015).

## 2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS

Nesta seção do estudo são descritos os resultados de ensaios mecânicos obtidos por outros pesquisadores da área, utilizados para a determinação de parâmetros como o de resistência e rigidez de misturas, com material fresado, cimento e emulsão asfáltica. É importante que os dados sejam avaliados de forma correta e comparados em tríplice amostragem na execução dos ensaios laboratoriais. Cada normativa traz consigo o método de ensaio que preconiza e estabelece parâmetros e procedimentos para execução dos ensaios e tratamento de dados, cujos parâmetros se pautam na quantidade de amostras necessárias para execução de ensaio validada e obtenção de dados concisos.

Os ensaios mecânicos realizados buscam avaliar parâmetros recorrentes ao comportamento de misturas, dados parâmetros funcionais e operacionais, descritos na sequência. Os ensaios relatados são: RCS, RT, MR e Fadiga Tração-Compressão, denominado como ensaio de Fadiga – Tensão Controlada.

### 2.4.1 Resistência à compressão simples (RCS)

Os ensaios de resistência à compressão simples ou resistência à compressão não confinada apresentam boa relação com a verificação de comportamentos de misturas estabilizadas com cimento Portland. É um ensaio simples e de rápida execução, custo baixo, confiável e bem expandido no meio técnico (SILVA, 2018). Conforme Specht *et al.* (2013), algum tempo depois da cura das amostras de 10x20 cm, elas foram submetidas a um esforço de compressão até sua ruptura, anotando-se a carga e dividindo pela área das amostras, obtendo-se então o RCS. Na pesquisa realizada pelos autores, as amostras foram para o processo de cura úmida por 7 e 28 dias e a velocidade de ruptura foi de 0,43 mm/s. Neste caso, utilizando o material fresado, havia ainda teores de cimento incorporados (de 2 a 5%), calculados a partir da massa seca do material.

Devido a deficiência de finos na análise granulométrica do fresado, Azevedo *et al.* (2017) destacam que é necessário realizar composições de material fresado com diferentes tamanhos de agregados virgens ainda existindo a dificuldade de encaixar a curva granulométrica das misturas nos limites indicados pelo DNIT. Em relação à

RCS, os autores afirmam que o teor de cimento gerou um ganho exponencial de resistência.

Para reciclagem com cimento, recomenda-se, no Brasil, que o teor aplicado para a dosagem da mistura reciclada seja definido pela resistência a compressão mínima de 2,1 MPa e máxima de 2,5 MPa aos 7 dias de cura (DNIT, 2013b). Em contrapartida, o Departamento de Estradas de Rodagem do estado do Paraná (DER/PR, 2005) determina, para a mesma idade, que a resistência à compressão simples seja de, no mínimo 3,5 MPa e, no máximo, 8 MPa. A Austroads (2002) define os níveis de cimentação das misturas em função da resistência a compressão e em função do comportamento resiliente aos 28 dias de cura, demonstrada pela Tabela 7.

Tabela 7 – RCS e MR aos 28 dias de cura em camadas cimentadas

<b>Nível de cimentação</b>	<b>Teor de cimento (%)</b>	<b>RCS (MPa)</b>	<b>Módulo de flexural (MPa)</b>
Modificado	0,75 – 1	< 1	≤1000
Levemente cimentado	2 – 3	1 – 4	1500 – 3000
Fortemente cimentado	4,5 – 5,5	> 4	≥5000

Fonte: Adaptado de Austroads (2002).

Os valores mínimos e máximos de RCS padronizados são utilizados como parâmetros de controle. Para o valor mínimo, o suporte ao tráfego projetado deve ser garantido, reduzindo assim o risco de ruptura por fragmentação superficial. Por outro lado, o valor limite (máximo) busca a restrição da reflexão de trincas por retração e fadiga e também minimizar a susceptibilidade à presença de água, responsável pelas mudanças de volumes. No entanto, o principal motivo para limitar a resistência, é evitar que a mistura se torne quebradiça, além de reduzir o fenômeno de reflexão de trincas (PCA, 2005).

Tanski (2016) encontrou, para os resultados de RCS, um aumento da resistência com a adição de cimento nas misturas, resultados que demonstram que a adição de 1% ocasionou melhoria das misturas. Dentre elas, destaca-se a mistura de 2% - 1% (emulsão-cimento) que apresentou 1,41 MPa de RCS. O autor ainda descreve o decréscimo dos valores aferidos na realização dos ensaios com o aumento do teor de emulsão presente nas misturas, pois os menores resultados são das misturas com 5% de emulsão, tanto para as misturas com ou sem adição de cimento.

Quanto ao modo de ruptura, o autor percebeu que apenas as amostras de 2% - 1% (emulsão-cimento) e 3% - 1% apresentaram ruptura frágil com um plano de ruptura definido. As demais misturas tiveram ruptura dúctil, em que não há definição de um plano de ruptura.

Queiroz (2011) observou uma tendência de incremento nos valores de RCS em relação aos valores obtidos. A adição de cal acarretou em um acréscimo gradativo e moderado da resistência à compressão, apresentando o valor mínimo de 0,84 MPa para 2% de cal e o máximo de 1,18 MPa para 10% de cal. A adição de cimento provocou acréscimo significativo e proporcional ao teor de aglomerante adicionado à mistura, apresentando o valor mínimo de 0,74 MPa, quando adicionado 2% de cimento e o máximo de 3,50 MPa, quando adicionado 10% de cimento. Com isso, todos os valores encontrados nos ensaios de compressão simples se apresentaram superiores aos valores recomendados.

Ao estudar os teores de material fresado proveniente da BR-285 próximo de Mato Castelhana, estipulados em 20%, 45% e 70% e teores de cimento de 2%, 4% e 6%, Azevedo *et al.* (2017) fixaram as variáveis em tempo de cura, em 7 dias, o tipo de cimento, CP – V ARI, e a energia modificada no ensaio de compactação Proctor. Inicialmente, caracterizam o material fresado, realizaram o ensaio de compactação Proctor para determinação de umidade ótima e massa específica máxima da mistura e, por fim, moldaram corpos de prova (CPs de dimensões 10 x 20 cm) para a realização do ensaio de RCS.

Ao produzir misturas a frio através da compactação Marshall, variando o teor de emulsão de suas amostras em 3%, 4% e 5%, e também a composição de agregados, os autores Jitsangiam *et al.* (2012) realizaram ensaios de MR e RT, além de ensaios de RCS. Como as amostras eram de maiores dimensões, foram compactadas com um método modificado da compactação Marshall.

Jitsangiam *et al.* (2012) destacam que a oscilação no teor de emulsão não tendenciou claramente a relação dos resultados na caracterização mecânica. Foram encontrados picos baixos e altos de RCS, exemplo disso é o fato de, para uma mistura com 5% de emulsão, o resultado foi 0,144 MPa, e para uma mistura com 3% de emulsão, foi encontrado um valor de 0,358 MPa. Os autores destacam que o tipo de agregado teve maior influência, melhorando os resultados com o aumento no teor de emulsão e, em alguns casos, aconteceu o contrário. Ainda, houveram situações em

que o teor de 4% de emulsão (intermediário) evidenciou melhores misturas em relação aos ensaios realizados.

#### **2.4.2 Resistência à tração por compressão diametral (RT)**

O ensaio brasileiro de compressão diametral foi desenvolvido por Fernando Luiz Lobo Barboza Carneiro, determinando de maneira indireta a resistência à tração em concreto de cimento Portland para corpos de prova cilíndricos. Este ensaio é também reconhecido mundialmente como “ensaio brasileiro” ou “*Brazilian Test*”, consistindo na aplicação de uma força que impõe um plano de ruptura por tração, idêntico ao plano de aplicação de carga que gera, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes e perpendiculares a esse diâmetro (NASCIMENTO, 2017).

O procedimento do *Brazilian Test* consiste em aplicar uma carga estática de compressão, com velocidade controlada, distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, com a finalidade de extrair as tensões de tração através do diâmetro horizontal perpendicular à carga. Com isso, obtém-se a medida resultante da RT (SILVA, 2018). No Brasil, segundo o DNIT (2013a), aos 7 dias de cura, a resistência à tração por compressão diametral deve estar entre 0,25 MPa e 0,35 MPa desde que a fração passante na peneira 4,75 mm seja de, no mínimo, 50%.

Klamt *et al.* (2018) avaliaram o desempenho do material fresado misturado com aglomerantes e adições minerais, quanto à resistência à tração por compressão diametral. O objetivo foi observar a sua aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos, na busca por soluções sustentáveis satisfatórias em termos de pavimentação. Durante a ruptura das amostras, percebeu-se que a fissura sempre ocorreu no sentido vertical, o que indica uma deformação crítica perpendicular ao diâmetro solicitado.

A análise da resistência à tração, no estudo de Klamt *et al.* (2018) foi obtida pela realização do ensaio brasileiro de compressão diametral elaborado pelo professor Lobo Carneiro. Os materiais que serviram como aglomerantes foram o cimento Portland CP IV – 32 e a cal hidratada CH-II de origem dolomítica, sendo utilizadas duas adições minerais, a sílica da casca de arroz e a cinza volante. Como resultado, demonstrou-se que a mistura que teve melhor resposta às adições químicas apresentando acréscimo na resistência, foi à mistura chamada de M16, com



uma composição de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra, 5% de sílica da casca de arroz e 5% de cimento com o resultado de 1,15 MPa seguida da mistura M10 com 1,00 MPa.

Bessa *et al.* (2014) verificaram que, ao aumentar o teor de emulsão asfáltica à mistura, maiores foram os valores encontrados. O aumento do valor de RT com a incorporação de mais ligante, de acordo com os autores, pode ter ocorrido devido a existência de uma maior coesão dos agregados nas misturas, o que promove uma maior estabilidade de seu esqueleto mineral. Foi encontrada uma média de 0,30 MPa para 2% de emulsão asfáltica, 0,33 MPa para 3% e 0,35 MPa para 4% de emulsão, com desvios padrão de 0,05, 0,04 e 0,03, respectivamente.

As misturas sem adição de cimento foram inferiores às misturas com adição de 1% de cimento no ensaio de RT (TANSKI, 2016). Nessa situação, a mistura 2%-1% (emulsão-cimento) obteve maior valor, com 0,19 MPa e a mistura de 4% de emulsão sem nada de cimento apresentou o valor de 0,04 MPa, sendo o resultado mais baixo para este ensaio. Além disso, o autor relata que, ao aumentar o teor de emulsão, em todas as misturas, não houve a diminuição linear dos resultados obtidos no ensaio, somente uma tendência de diminuição do RT ao aumentar o teor de emulsão.

Bessa *et al.* (2016) relatam acerca variação de cimento. Misturas com 0,5% de cimento, ou menos, apresentam pouca melhoria na resistência à tração após 7 dias curados. Todavia, a adição de 2,5% ou mais de cimento, provavelmente forneceria uma fragilidade para as misturas junto com a rigidez das mesmas, podendo ocasionar problemas de fissuração por fadiga. Em contrapartida, ao investigar a relação com o tempo de cura, os resultados apontaram que a resistência aumentou até os 60 dias de cura. Os valores médios obtidos após este período foram quase 100% maior do que o obtido nos primeiros 7 dias de cura. Entre os 60 e 90 dias de cura, a resistência média à tração diminuiu, mas os valores permaneceram semelhantes, então é provável que as pequenas diferenças observadas sejam devido aos materiais. O valor mínimo encontrado pelos autores foi de 0,40 MPa para cura aos 60°C.

Na literatura internacional, a recomendação para as tensões na camada de base reciclada são de 310 kPa (0,31 MPa) para a ARRA (2016); Wirtgen (2012) recomenda o valor mínimo de 225 kPa (0,225 MPa); e Collings *et al.* (2020) indicam o mínimo de 175 kPa (0,175 MPa). Como as tensões de tração se desenvolvem na parte

inferior da camada de base, é importante avaliar também a vida de fadiga das bases recicladas.

### **2.4.3 Módulo de Resiliência (MR)**

O ensaio de MR, conforme o explicado por Bernucci *et al.* (2022), é utilizado para determinar a rigidez das misturas asfálticas, levando em consideração o comportamento elástico linear destas quando os deslocamentos em análise são recuperáveis (resilientes), atendendo a lei de Hooke. O MR acaba por não representar um parâmetro puramente elástico das misturas asfálticas pois tem associado ao seu cálculo, um dado pulso de carregamento onde ocorrem deformações viscoelásticas parcialmente contabilizadas como deformação elástica.

De acordo com Brito (2006), há diversos estudos dedicados a avaliar os fatores aos quais o módulo de resiliência é sensível e em que magnitude isto ocorre. Os fatores que influenciam no comportamento de misturas asfálticas são o tipo de agregado, graduação, teor e propriedades do ligante asfáltico, densidade, entre outros.

David (2006) investigou a influência de dois tipos de agente de reciclagem emulsionado, um deles foi o RL-1C e, o outro, ARE-75. O valor obtido para o módulo de resiliência foi mais elevado para a mistura com fresado+pó+RL-1C em comparação às demais. Esta mistura também resultou em um comportamento diferente dos outros, mostrando uma curva que define um pico entre os teores de ligante asfáltico de 2,5% e 3%, estando na faixa de 5370 e 5415 MPa de MR. Para as misturas sem adição de pó de pedra, os resultados do módulo de resiliência permaneceram praticamente iguais, sendo 2813 MPa o menor valor para 2% de ligante e 3871 MPa o maior resultado para 3,5% de ligante. Por outro lado, em comparação a todas as misturas, o resultado mais baixo de módulo de resiliência (1932 MPa) encontra-se com a mistura de fresado+pó+ARE-75.

Deve-se considerar a compatibilidade de rigidez entre as camadas do pavimento, havendo assim a coerência entre os valores de rigidez e de resistência dos materiais constituintes das camadas. Além disso, os valores de MR e de RT da mistura são cruciais para dimensionar a estrutura do pavimento. Quando se adotam métodos mecanísticos que têm como base o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos das camadas constituintes do pavimento, esses acabam sendo fatores relevantes (DAVID, 2006).

Em relação a variação do teor de emulsão asfáltica, Bessa *et al.* (2014) testaram quatro corpos de prova por teor de emulsão (2%, 3% e 4%) para cada um dos ensaios mecânicos. Os comportamentos gerais das misturas foram relatados através de resultados obtidos. Os maiores valores de MR ficaram com as misturas com o menor teor de emulsão (2%), o que representa um valor médio de 1515 MPa. Já para os outros dois teores não há diferença clara para essa propriedade, pois o teor de 3% resultou em 1397 MPa e o teor de 4% resultou em 1383 MPa. Neste caso, os valores de MR tendem a diminuir com o aumento do teor de emulsão, destacando como possível justificativa, que a possível quantidade de vazios das misturas teve influência mais relevante do que o teor e emulsão em si.

Os resultados alcançados para as misturas com variação no teor de emulsão mostram que o aumento desse teor levou a misturas com menores valores de MR, o que se explica pela presença da maior quantidade de fluido na fabricação das amostras. Ainda se acredita que os dois materiais podem melhorar o comportamento das misturas produzidas, principalmente ao utilizar temperaturas de curas mais elevadas, o que não foi efetuado nesse estudo (BESSA *et al.*, 2014).

Outra explicação para estes resultados é o tipo de compactação utilizado (Marshall), fazendo com que as misturas geradas fossem semelhantes, possuindo comportamento mecânico também similar, independentemente de sua composição. O elevado volume de vazios das misturas também as afetam, o que pode ter se sobressaído à incorporação de cimento, impedindo que o material ajudasse no ganho de resistência das amostras caracterizadas.

Com o teor fixo de emulsão asfáltica em 3% e teor variável de cimento em 1% e 2%, percebe-se resultados com maior semelhança entre si. Para as misturas sem cimento, a média de MR foi de 1253 MPa, para 1% de cimento o resultado foi de 1276 MPa e, para 2% de cimento, a média de MR resultou em 1235 MPa. Ressalta-se o comportamento semelhante à emulsão, pois com o aumento no teor de cimento em 1%, menor foi o resultado de módulo de resiliência. Contudo, os resultados de MR para as misturas com quantidades variáveis de cimento foram muito próximos, independentes do teor.

Ao estudar a incorporação do material fresado ao cascalho laterítico de base no Distrito Federal, Araújo, Farias e Carvalho (2004) mostraram que existe uma percentagem ótima de fresado para auxiliar na estabilidade da mistura, proporcionando maior rigidez e resistência. De acordo com os autores, os valores de

RCS tiveram um ganho em torno de 50% para a mistura cascalho-fresado em relação ao cascalho puro e o módulo resiliente obteve ganho na rigidez de 46%. Estes e os demais resultados mostraram que incorporar o fresado para recuperação de bases granulares degradadas é uma metodologia ecológica e tecnicamente viável. No tocante ao ensaio de módulo de resiliência, a incorporação de RAP produz misturas com maior rigidez e resistência, principalmente quando adicionado 2% de cimento Portland para estabilização química da mistura.

#### **2.4.4 Ensaio de fadiga à tração por compressão diametral**

A fadiga é decorrente da possível variação cíclica ou alternada de cargas de um material. Repetir esses esforços provoca falha e fratura por fadiga, com uma tensão muito menor do que o limite de resistência estática do material. A origem desta falha ocorre sem aviso e pode ocorrer pela mudança rápida de secções, marca superficial no material, pequenas inclusões ou outro tipo de defeito no material (ZOLIN, 2010).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), a fadiga é um problema não linear, ou seja, a acumulação de dano de cada uma das solicitações não é similar. Para tanto, é necessário conhecer a vida de fadiga da mistura, em termos de vida de fratura ( $N_f$ ), que consiste no número total de aplicações de uma certa carga necessários à fratura da amostra, e a vida de serviço ( $N_s$ ), que é o número total de aplicações dessa mesma carga, que provoque a redução da rigidez inicial da amostra até certo nível.

A ruptura por fadiga se caracteriza pela redução dos parâmetros de rigidez de um material cimentado, originado pelo acúmulo de danos em locais de menor homogeneidade, mediante a formação de fraturas progressivas na estrutura interna do material (BACK, 2022). O ensaio de compressão diametral para mensuração da vida de fadiga é realizado através do equipamento de compressão diametral à tensão controlada (TC). Para Boeira *et al.* (2018), o fenômeno de fadiga é complexo e está vinculado tanto às características estruturais, quanto de materiais nos pavimentos revestidos por concreto asfáltico, e também pelo clima.

Segundo Specht (2004), as condições ruins de determinada rodovia estão atreladas a várias patologias, das quais citam-se as deformações permanentes excessivas e fissuras de fadiga, intimamente ligadas com o tráfego e a estrutura do

pavimento. Por fim, a retração térmica e a desagregação estão relacionadas com as características dos materiais empregados e as condições climáticas atuantes.

São conhecidas duas normas para esse ensaio, a norma DNIT 434/2021 – ME (DNIT, 2021), intitulada Pavimentação – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente, e a norma DNIT 183/2018 – ME (DNIT, 2018b), denominada Pavimentação – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Na representação dos resultados deste ensaio, a vida de fadiga deve ser determinada como o número total de aplicações de carga que causa a completa ruptura do corpo de prova. Os resultados do ensaio devem ser aplicados em modelos matemáticos por meio de regressões lineares, com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da curva resultante de 12 corpos de prova superior a 0,80, na tentativa de um bom ajuste.

Back (2022) obteve para algumas misturas o patamar de 1.000.000 de ciclos, atendendo ao critério de vida de fadiga para BGTC, exposto pela Austroads (2008). A autora identificou que para as misturas SJ (3,5) e DP (3,5) que este patamar é alcançado para um %RF 46% e 42%, respectivamente, enquanto que para SJ (5,5) e DP (5,5) é 64% em ambas. Isso reflete na vida de fadiga, ou seja, se a BGTC estiver submetida a um %RF menor que este, chegará na vida de fadiga efetiva esperada. No que se refere à análise do desempenho à fadiga das misturas de BGTC em função da Tensão de Tração, Back (2022) atingiu o patamar de 1.000.000 de ciclos para tensão de aproximadamente 0,169 MPa para DP (3,5) (41% da RTCD) e 0,267 MPa para SJ (3,5) (48% da RTCD). Sendo assim, se as misturas estiverem submetidas a valores de tensões inferiores aos citados, as camadas cimentadas irão suportar o número de 1.000.000 de ciclos, vistos como referência para a vida de fadiga efetiva.

O ensaio de fadiga para mistura com emulsão asfáltica foi realizado por Silva *et al.* (2016) sob condições de 25°C de temperatura, com módulo de MR médio de 1.616 MPa e RT média de 0,44 MPa. Notou-se que as diferenças de tensões aplicadas foram, na maioria das vezes, inferiores a 1.000 aplicações. A vida de fadiga x deformação permanente apresentou coeficiente de determinação de 0,9165%, e a vida de fadiga x diferença de tensões, um coeficiente de determinação de 0,9097%.

Em pesquisa realizada por Gaspar *et al.* (2014), o critério de ruptura adotado para o ensaio foi a deformação de 5 mm do corpo de prova e foram testados os níveis de tensão de ruptura de 20%, 30%, 40% e 50% de cada mistura, obtidas nos ensaios de resistência à tração. O ensaio de fadiga apresentou resultados interessantes por

seguir a mesma tendência da análise de energia dissipada no ensaio de resistência à tração, com maior resultado para a Mistura Asfáltica Antirreflexão de Trincas (MAAT) e menor para a mistura de granulometria SPV19mm e SBS 60/85.

Dessa forma, o parâmetro da energia dissipada aparenta ser uma boa opção para auxiliar no ranqueamento de misturas asfálticas em relação à vida de fadiga a nível de dosagem, por ser um ensaio rápido. Contudo, isso não elimina a necessidade de investigação da fadiga do material, por ser um ensaio realizado para diferentes níveis de carregamento, além de apresentar influência da rigidez dos materiais. Neste estudo foram utilizados três tipos de agregados naturais graníticos e dois ligantes asfálticos modificados (GASPAR *et al.*, 2014).

Wirtgen (2012) descreve que, devido ao aumento da resistência de camadas tratadas com cimento, ocorre o aumento de sua fragilidade. Como consequência, ocorre redução na flexibilidade, ocasionando a proliferação acelerada de rachaduras mediante as solicitações do tráfego incidente, reduzindo, a longo prazo, o seu desempenho estrutural. Ressalta-se que o surgimento das trincas e a sua propagação são processos distintos e devem ser analisados como tal.

Há outras variáveis que influenciam na ocorrência do fenômeno de fadiga para misturas cimentadas, são elas: granulometria e diâmetro nominal da partícula; forma de partícula; densidade; teor de umidade; eficiência da mistura e padrão de fissuração, sendo que alguns dos fatores também exibem dependência do consumo de cimento e do tipo de cimento que é escolhido (AUSTROADS, 2014).

#### **2.4.5 Porosidade e teor volumétrico de cimento das misturas**

O estudo primordial sobre as possíveis relações existentes entre a porosidade e o nível de cimentação de misturas foi desenvolvido por Lanarch (1960). A fração de vazios (incluindo a parcela de água e ar incorporados), segundo o autor, deve ser estudada, em razão de ser um parâmetro fundamental para sua dosagem. Em misturas de concreto tradicionais, por exemplo, essa relevância não é exibida.

Balbo (2006) identificou, em seu estudo, que há pontos específicos das amostras que possuem uma alta porosidade e que essas situações demonstram a grande heterogeneidade da matriz de BGTC. Além disso, as zonas onde se propagam as fissuras é exacerbada durante carregamento excessivo de concentração de tensões em torno de áreas vazias. Observou-se que aquelas misturas de BGTC

moldadas no ramo seco da curva de compactação apresentavam uma matriz mais homogênea e menos porosa que aquelas amostras compactadas na umidade ótima.

Atualmente, diversos pesquisadores vêm desenvolvendo métodos para a dosagem de misturas cimentadas. Essas metodologias levam em consideração o tipo de material utilizado, quantidade de agente cimentante e a porosidade das misturas. Por exemplo, estudos realizados por Foppa (2005), Dalla Rosa (2009), Pasche (2016), Silva (2018), Rolim (2020), Back (2022), entre outros, comprovam a existência de uma relação harmônica entre o teor do agente cimentante e a porosidade presente nas misturas.

Foppa (2005) reconheceu um fator importante no momento de relacionar a umidade na determinação da RCS de misturas cimentadas. A relação  $\eta/C\%$  só é considerada em diferentes traços quando ambas as misturas são preparadas com o mesmo teor de umidade. Dado que a compactação ocorreu sobre variados teores de umidade, mesmo mantendo a massa específica aparente seca constante.

Quanto à influência da porosidade, de acordo com Pasche (2016), independentemente da quantidade de cimento adicionada na mistura, a redução na porosidade do material compactado promoveu ganhos significativos nas resistências das misturas. As resistências à compressão simples e a tração por compressão diametral aumentaram potencialmente ao reduzir a porosidade da mistura compactada. Esse mecanismo pelo qual a redução na porosidade influencia a resistência da mistura com cimento, parece ser relacionado à existência de índice de vazios e uma melhor ligação entre o esqueleto mineral da mistura.

Existe também o procedimento técnico de acordo com o DNIT 427/2020 – ME para determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida de misturas asfálticas não compactadas, utilizando o método *Rice*. Esse método vem sendo bastante utilizado para misturas asfálticas, utilizando amostras não compactadas.

De acordo com Silva (2018), empregando a relação  $\eta/C\%$ , o projetista pode adotar adequadamente a energia de compactação e o teor de cimento a ser utilizado, prezando pelas especificações técnicas e menor custo possível. Além disso, a sua utilização é de grande valia para controlar a execução das camadas cimentadas. Por exemplo, se constatada uma compactação inferior à estabelecida, o executor pode estimar com segurança a perda de resistência e rigidez da camada e conseqüentemente poderão ser utilizadas medidas cautelares.

### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Na evolução deste capítulo, são apresentadas as informações relevantes acerca dos materiais, métodos e programa experimental que foram utilizados na presente pesquisa. Apresentam-se as principais características dos materiais pétreos (virgens e RAP) e também dos aglomerantes betuminoso (emulsão asfáltica) e hidráulico (cimento) e, por fim, são abordados os ensaios mecânicos. A metodologia para a preparação das misturas também é descrita neste item, compostas por uma matriz pétreo de referência (brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra) e uma matriz pétreo reciclada com 70% RAP e 30% pó de pedra, para posteriormente combiná-las com os teores de cimento de 1% e 3% e emulsão asfáltica nos teores de 0%, 2% e 3%.

Visando otimizar a leitura e organização deste texto, também são apresentados neste capítulo alguns dos resultados preliminares, considerados importantes para seu contexto.

#### 3.1 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

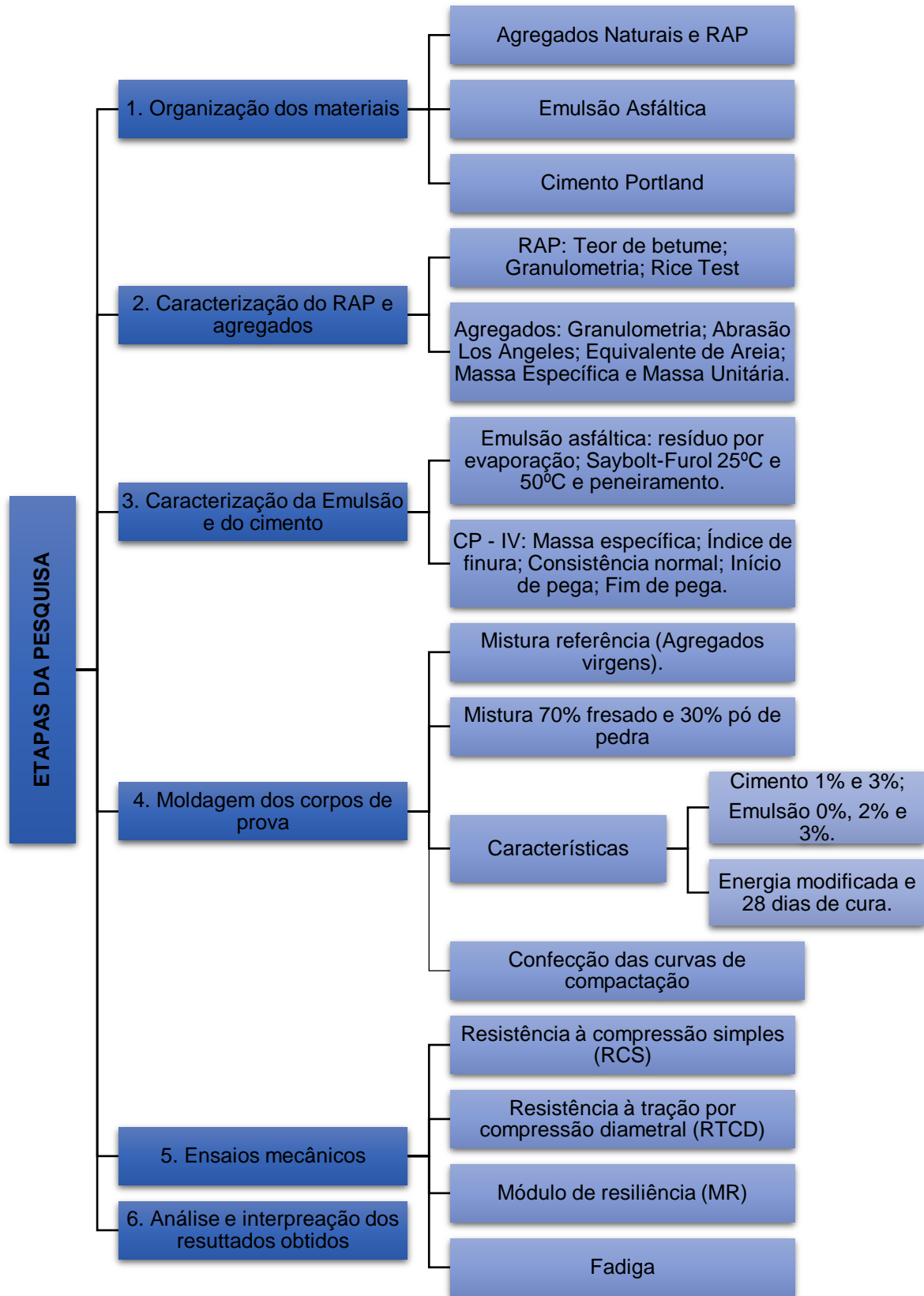
Este estudo teve por objetivo integrar o conhecimento referente ao desempenho das misturas de agregados naturais e com a utilização de material fresado (RAP) estabilizadas com emulsão asfáltica e cimento. Para que os principais objetivos desta pesquisa fossem concluídos, a seção experimental foi fragmentada de forma a realizar as etapas abaixo:

- a) Organização dos materiais pétreos (virgens e RAP);
- b) Aquisição da emulsão asfáltica de petróleo e do cimento CP – IV;
- c) Caracterização de alguns materiais: RAP, agregados virgens, emulsão asfáltica e cimento;
- d) Definição da granulometria, das misturas realizadas e dosagem;
- e) Moldagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios;
- f) Realização dos ensaios mecânicos sob processo de cura de 28 dias;
- g) Análise dos resultados.

A partir da definição das etapas do projeto a serem concluídas, elaborou-se um fluxograma para melhor visualização da estrutura da pesquisa, a qual é demonstrado pela Figura 2.



Figura 2 – Estrutura da pesquisa em formato de fluxograma



Fonte: Autora.

A Tabela 8 detalha os ensaios realizados com as respectivas nomenclaturas adotadas para cada uma das misturas, considerando o material utilizado, seja ele fresado ou natural, os teores de cimento e, por fim, os teores de emulsão asfáltica. O tempo de cura destinado aos ensaios foi de 28 dias de cura, de acordo com o que já vem sendo empregado em estudos por outros autores (BESSA *et al.*, 2014; ROSA *et al.*, 2015; TANSKI, 2016; ROLIM, 2020; BACK, 2022).

Tabela 8 – Nomenclatura dos CPs e quantidade de CPs por ensaio

Mistura	Nomenclatura	Cimento (%)	Emulsão (%)	Curvas de Compactação	Ensaio (28 dias)		
					RCS	RT/MR	Fadiga
Referência (REF)	REF C1-E0	1	0	5	0	3	20
	REF C1-E2		2	5	4	6	
	REF C1-E3		3	5	4	6	
	REF C3-E0	3	0	5	0	0	
	REF C3-E2		2	5	4	6	
	REF C3-E3		3	5	4	6	
70% fresado 30% pó de pedra (FP)	FP C1-E0	1	0	5	0	3	
	FP C1-E2		2	5	4	6	
	FP C1-E3		3	5	4	6	
	FP C3-E0	3	0	5	0	0	
	FP C3-E2		2	5	4	6	
	FP C3-E3		3	5	4	6	
Total de corpos de prova por ensaio				60	32	54	20
Total geral				166			

Fonte: Autora.

Diante disso, as siglas com REF, foram adotadas para as misturas denominadas de referência e as siglas FP foram destinadas às misturas de fresado e pó de pedra. Os números e letras que as acompanham são referentes aos teores de cimento e emulsão envolvidos. Ressalta-se que o equipamento idealizador do ensaio de fadiga é extremamente delicado e solicitado, portanto, na presente pesquisa, esse ensaio foi realizado somente com a mistura que apresentou o melhor resultado geral de RT, sendo confeccionadas 20 amostras, que foram ensaiadas aos 28 dias de cura.

Como observado na Tabela 9, o total de corpos de prova para os ensaios propostos foi de 166 amostras para as 12 misturas. Entretanto, após a realização das curvas de compactação foram moldados alguns corpos de prova como forma de teste, e dedicados ao ensaio de RT. Neste caso, as amostras sem porcentagem de emulsão

não suportaram as cargas do ensaio, o que resultou na ausência de resultado. Por esse motivo optou-se por não seguir a diante com a moldagem das amostras para essas misturas.

Em testes iniciais executados, as misturas frias seriam misturadas e homogeneizadas à mão, com auxílio de bandejas e colher. Entretanto, ao obter a amostra compactada, verificou-se certa inconsistência entre as partículas e falta de homogeneização da emulsão asfáltica com os agregados e o cimento (Figura 3). A Figura 4 ilustra o momento do ensaio referente a mistura que se degradou, sem mostrar resultados no momento do ensaio e também o estado final da amostra rompida.

Figura 3 – Amostra de teste com emulsão asfáltica misturada à mão



Fonte: Autora.

Figura 4 – Ensaio de RT para amostras sem emulsão asfáltica



Fonte: Autora.

Cabe ressaltar que, além da quantidade apresentada na tabela, foram realizados ainda 40 corpos de prova de 10 x 6,50 cm para proceder com os testes de umidade, compactação e resistência, que precisaram ser descartados por não se enquadrarem nos requisitos, além de ausência de resultados esperados. A partir de alguns parâmetros evidenciados, seguiu-se com a moldagem para as próximas misturas e a forma utilizada para moldagem das amostras é relatada adiante.

Em estudo realizado com material fresado e pó de pedra por Molz e Cervo (2019), destaca-se que é importante observar a natureza granular da mistura, pois elas podem não apresentar propriedades aglutinantes e se partem durante a retirada do molde. Nessa situação, as propriedades mecânicas da mistura analisada através dos ensaios de MR, RT e RCS, não obtiveram resultados. Portanto, é evidente a necessidade de inserção de um material aglutinante e, nesta pesquisa, utilizou-se a emulsão asfáltica em conjunto com o cimento.

## 3.2 MATERIAIS EMPREGADOS

Nesta seção apresentam-se os materiais utilizados para a realização das misturas, seguidos de suas respectivas caracterizações. As informações são referentes aos agregados minerais e agregado reciclado, com o intuito de avaliar a influência de suas características no desempenho mecânico das misturas.

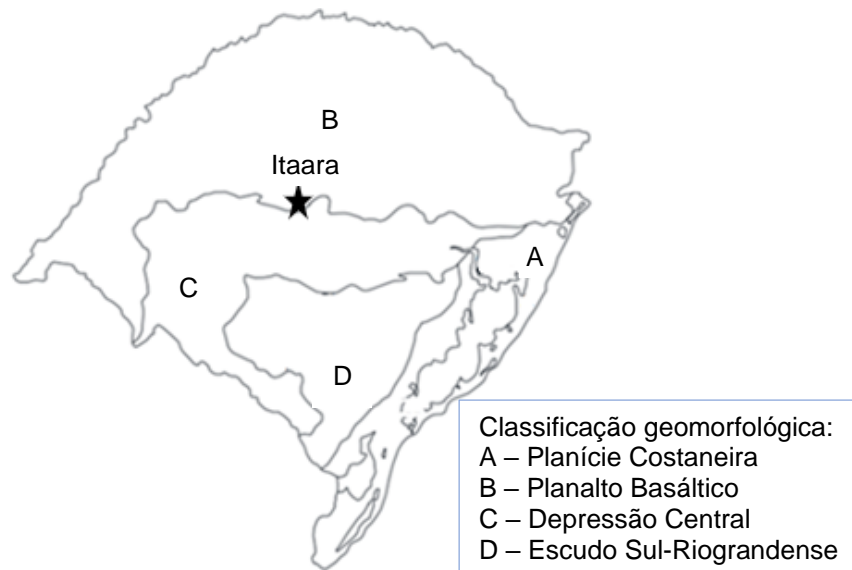
### 3.2.1 Agregados pétreos

Os agregados pétreos empregados neste estudo são provenientes do município de Itaara, RS, fornecidos pela empresa Della Pasqua Engenharia e Construções LTDA. Back (2022) descreve que embora essa rocha seja predominantemente classificada como Riodacito, através da análise macroscópica e descrição das características da área de lavra, detectou-se a presença de um dique, com largura de até cinco metros, encaixado em fraturas paralelas contendo uma rocha secundária, classificada como rocha ígnea extrusiva intermediária e ácida – Dacito. Sendo assim, apresenta um comportamento com menor fraturamento e alteração que as demais porções ao redor.

O estado é constituído por quatro formações geológicas, apresentadas na Figura 5. O município de Itaara/RS está localizado na formação geológica do Planalto

Basáltico. Os agregados na região classificam-se como um Riodacito de origem vulcânica (POSSEBON, 2018).

Figura 5 – Formações geológicas e localização da coleta dos agregados



Fonte: (POSSEBON, 2018, p. 56).

A rocha em questão é classificada como rocha ígnea extrusiva ácida (Riodacito) e possui coloração cinza claro com tons escuros, o que evidencia níveis de intemperização que vão de moderado a alto, dependendo do local em questão. A Figura 6 ilustra a aparência dos agregados, que são as britas 3/4" e 3/8" e o pó de pedra. Esses mesmos agregados foram empregados por Possebon (2018), Silva (2018) e Back (2022) em estudos do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação Asfáltica e Segurança Viária (GEPPASV) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Algumas propriedades devem ser aferidas em laboratório, como o ensaio equivalente de areia em porcentagem, DNER-ME 054 (DNER, 1997a), e massa específica em  $\text{g/cm}^3$ , DNER – ME 195 (DNER, 1997b), para agregados miúdos, volume de vazios (%) e massa unitária em  $\text{kg/cm}^3$ , NBR NM 45 (ABNT, 2006), para todos os agregados e ainda a massa específica ( $\text{g/cm}^3$ ), absorção em porcentagem, NBR NM 53 (ABNT, 2009a), e abrasão Los Angeles DNER – ME 035 (DNER, 1998a) somente para os agregados graúdos. As propriedades desse mesmo material foram encontradas por Possebon (2018) e Silva (2018) e são demonstradas na Tabela 9.

Figura 6 – Aparência dos agregados naturais



Fonte: Autora.

Tabela 9 – Propriedades dos agregados

Propriedade	Normativa	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra
Abrasão "Los Angeles" (%)	DNER-ME 035 (DNER, 1998a)	13 %	–	–
Equivalente de areia (%)	DNER-ME 054 (DNER, 1997a)	–	–	80,04
Absorção (%)	NBR NM 53 (ABNT, 2009a)	2,93	3,06	–
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,48	2,45	–
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 195 (DNER, 1997b)	–	–	2,667
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )		1388,88	1417,75	1523,07
Índice de vazios (%)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	48,16	46,56	42,89

Fonte: Adaptado de Possebon (2018, p. 62).

Em classificação realizada por Brondani (2019), esse agregado é considerado um Riodacito, com textura afanítica a fanerítica, muito fina. É composta por 24,22% de ferro, 38,44% de sílica, 9,48% de cálcio e 13,99% de potássio. A autora verificou que a rugosidade do agregado melhora a adesividade e que esta apresenta uma tendência a ser maior para rochas que possuem textura muito fina a fina, e menor para rochas de textura grossa ou as finas que possuam minerais alterados ou valores de sanidade mais elevados.

### 3.2.2 Material fresado (RAP)

O RAP empregado na pesquisa é originário de um trecho fresado da RS-400, localizado entre os municípios de Candelária, RS e Sobradinho, RS, e foi utilizado também por Correa (2020) em seus estudos. Este revestimento possui em sua composição o CAP 50/70, de acordo com o Departamento de Estradas e Rodagens do Estado do Rio Grande do Sul (DAER-RS), e o processo de fresagem ocorreu no mês de maio de 2018.

Para caracterizar o material fresado, foram peneiradas três amostras antes da extração do betume, normatizado por DNER – ME 083 (DNER, 1998b). Em seguida, foi confeccionada a curva granulométrica média obtida. A partir de então, analisou-se o comportamento da curva com os limites de suas composições do material fresado e enquadrou-se o material em uma faixa prescrita pelas normas, acrescentando o pó de pedra. A aparência do RAP sem os grumos é ilustrada pela Figura 7.

Figura 7 – Aparência do RAP da RS-400 utilizado na pesquisa



Fonte: Autora.

Após extraídas as informações preliminares, o teor de betume foi analisado utilizando o ensaio no Rotarex elétrico, por meio de centrifugação, seguindo a norma DNER-ME 053 (DNER, 1994d), em três amostras de RAP. Para finalizar a caracterização do RAP, verificou-se a densidade do material, cujo resultado foi obtido através do ensaio Rice, normatizado pela NBR 15619 (ABNT, 2016c). O cálculo da densidade máxima medida (DMM) é realizado de acordo com a equação 1.

$$DMM = \frac{B}{(B+A-C)} \times 0,99707 , \quad [1]$$

em que:

DMM = Densidade máxima medida;

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

B = massa da amostra seca ao ar (g);

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

Observação: 0,99707 é referente a densidade da água de 25°C (g/cm<sup>3</sup>).

De posse dessas informações, o teor de ligante do RAP foi obtido por Correa (2020) e os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Teor de ligante do RAP 50/70 e densidade

Ensaio	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	DP
Teor de ligante (%)	5,40	5,42	5,32	5,38	0,043
DMM	2,663	2,679	2,671	2,671	0,008

Fonte: Adaptado de Correa (2020, p. 53).

### 3.2.3 Emulsão asfáltica (RL – 1C)

A emulsão utilizada nesta pesquisa já está disponível no mercado como emulsão asfáltica catiônica estabilizante de bases granulares. Ao recebê-la, armazenou-se em local seguro e livre de qualquer intempérie, protegida dentro dos galões plásticos lacrados, conforme chegaram da fábrica (Figura 8).

Figura 8 – Armazenamento da emulsão asfáltica utilizada



Fonte: Autora.



De acordo com as instruções do fabricante, os galões precisavam ser girados de forma suave, a cada cinco dias não trabalhados. Com isso, o líquido circulava dentro dos galões, sem a entrada de ar. Os resultados de caracterização da emulsão foram obtidos através do fabricante e seus resultados constam na Tabela 11, o que condiz com os limites estabelecidos pelas normativas vigentes.

Tabela 11 – Ensaio de caracterização da emulsão asfáltica

Características	Unidade	Método de ensaio	Resultados	Limites	
				Mínimo	Máximo
Resíduo asfáltico	% (m/m)	NBR 14376 (ABNT, 2019)	63,50	62,00	-
Viscosidade Saybolt Furol, 25°C	ssf	NBR 14491 (ABNT, 2007a)	38	20	200
Peneiramento, retido na peneira 0,84 mm	% (m/m)	NBR 14393 (ABNT, 2012)	0,07	-	0,10
Sedimentação, 5 dias, diferença do resíduo entre topo e fundo	% (m/m)	NBR 6570 (ABNT, 2016d)	-	-	5
Carga de partícula	-	NBR 6567 (ABNT, 2015a)	Positiva	Positiva	
Desemulsibilidade	% (m/m)	NBR 6569 (ABNT, 2009b)	2,28	-	50

Fonte: CBB Asfaltos, 2020<sup>1</sup>.

Em relação às suas características, para a emulsão asfáltica RL-1C, a viscosidade Saybolt Furol recomendada pelo Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP, 1999) é de 20-100; o resíduo por evaporação, % em peso, é 60. No estudo de Silva *et al.* (2016), o ligante utilizado foi a emulsão do tipo RL-1C, composto por 61% CAP e 39% de fase aquosa. Os autores encontraram uma viscosidade Saybolt Furol, a 25°C, 25; um resíduo por evaporação, % em peso, de 61,02; no ensaio de peneiração (resíduo na peneira de 0,84 mm) 0,34; % em peso de CAP; e carga de partícula positiva. A carga de partícula ficou em concordância com o IBP e o valor encontrado no ensaio de peneiração (resíduo na peneira de 0,84 mm), % em peso de CAP, foi de 0,1. Perante aos resultados encontrados, os autores descrevem que o mais crítico foi

<sup>1</sup> Ensaio elaborado pela CBB Asfaltos e enviados pela empresa junto com as amostras de emulsão.

o de resíduo da peneiração, que ficou bem acima das exigências, o que, acredita-se, possa ser recuperado com a realização mais criteriosa do ensaio (SILVA *et al.*, 2016).

Kavussi e Modarres (2010) destacam que adicionar a emulsão amplia a coesão entre os materiais granulares que compõem a mistura, sendo responsável por formar ligações flexíveis entre os componentes. Por isso, outro ponto importante para análise da emulsão asfáltica é o ligante asfáltico utilizado em sua produção. Na Tabela 12 encontram-se os resultados de caracterização elaborados pelo fabricante do ligante asfáltico que compõem a emulsão.

Tabela 12 – Ensaio de caracterização do ligante asfáltico contido na emulsão, obtido por evaporação (NBR 14896)

Características	Unidade	Método de ensaio	Resultados	Limites	
				Mínimo	Máximo
Teor de betume	%	NBR 14855 (ABNT, 2015b)	97,20	97	-
Penetração, 100g, 5s, 25°C	0,1 mm	NBR 6576 (ABNT, 2007b)	55	40	150
Ductilidade 25°C	cm	NBR 6293 (ABNT, 2015c)	91,70	40	-

Fonte: CBB Asfaltos, 2020<sup>2</sup>.

### 3.2.4 Cimento Portland

No processo de reciclagem a frio, a emulsão asfáltica quando utilizada como principal ligante para restauração de pavimentos não obtém os mesmos resultados de resistência do que no método a quente. Portanto, optou-se por adicionar o cimento à mistura asfáltica, com o intuito de sanar essa deficiência e estudar a sua influência perante os diversos aspectos.

Devido ao acesso limitado de aquisição do cimento CP II (um dos mais utilizados no estado do RS), que a nível estadual é disponibilizado apenas por fornecedores de cimento a granel, dificultando assim o armazenamento e manuseio do cimento para as pesquisas com longos períodos práticos, de forma a comprometer suas características originais, optou-se pela utilização do cimento Portland Pozolânico (CP – IV 32) da marca Cauê da InterCement (Figura 9). Justifica-se que, em questões

<sup>2</sup> Ensaio elaborado pela CBB Asfaltos e enviados pela empresa junto com as amostras de emulsão.

de logística e custo, o CP IV tem ampla utilização na região central do estado do RS e comercialização não a granel.

Figura 9 – Armazenamento do cimento CP IV utilizado



Fonte: Autora.

O CP – IV é designado como Cimento Portland pozolânico e, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018a), há limites mínimos e máximos admissíveis na composição do cimento (porcentagem em massa). Portanto, os limites de clínquer + sulfatos de cálcio devem estar entre 45 – 85, a quantidade do material pozolânico entre 15 – 50 e o material carbonático entre 0 – 10.

Para a caracterização do cimento, foram realizados os ensaios de massa específica ( $\text{g/cm}^3$ ), índice de finura (%), consistência normal (%) e o início e fim de pega (h). A Tabela 13 apresenta as normas adotadas, os ensaios realizados para sua caracterização e os resultados.

Todos os resultados de caracterização do cimento mantiveram-se dentro das normativas vigentes. Ressalta-se que o cimento Portland pozolânico possui baixo calor de hidratação e isso o torna recomendável na concretagem de grandes volumes e temperaturas mais elevadas. Isso proporciona a redução do calor de hidratação e aumento da resistência em idades avançadas.

Tabela 13 – Ensaio de caracterização para o cimento

(continua)

Propriedade	Norma	Resultados
Massa Específica ( $\text{g/cm}^3$ )	NBR 16605 (ABNT, 2017)	2,705
Índice de Finura (%)	NBR 11579 (ABNT, 2013c)	3,04

		(continuação)
Consistência normal (%)	NBR 16606 (ABNT, 2018b)	33
Início de pega (h)	NBR 16607 (ABNT, 2018c)	4:45
Fim de pega (h)	NBR 16607 (ABNT, 2018c)	6:15

Fonte: Autora.

### 3.2.5 Água

A água utilizada nos processos de moldagem é potável e isenta de matéria orgânica, o que atende a NBR 11803 (ABNT, 2013b). Foi obtida a partir da rede hidráulica do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. Utilizou-se a mesma água no processo de mistura aos materiais à 25°C, temperatura comumente utilizada em ensaios laboratoriais. Excetuam-se os ensaios em que era necessária a utilização de água destilada.

## 3.3 PROCEDIMENTOS

Apresentam-se, nesta seção, as etapas de laboratório, que englobam a granulometria das misturas e a forma com que foi realizada a compactação para determinar as suas respectivas umidades ótimas. Além disso, também é realizada a descrição dos procedimentos necessários para realizar a moldagem e cura dos corpos de prova e, por fim, relatam-se os ensaios mecânicos aos quais as amostras foram submetidas.

### 3.3.1 Granulometria das misturas

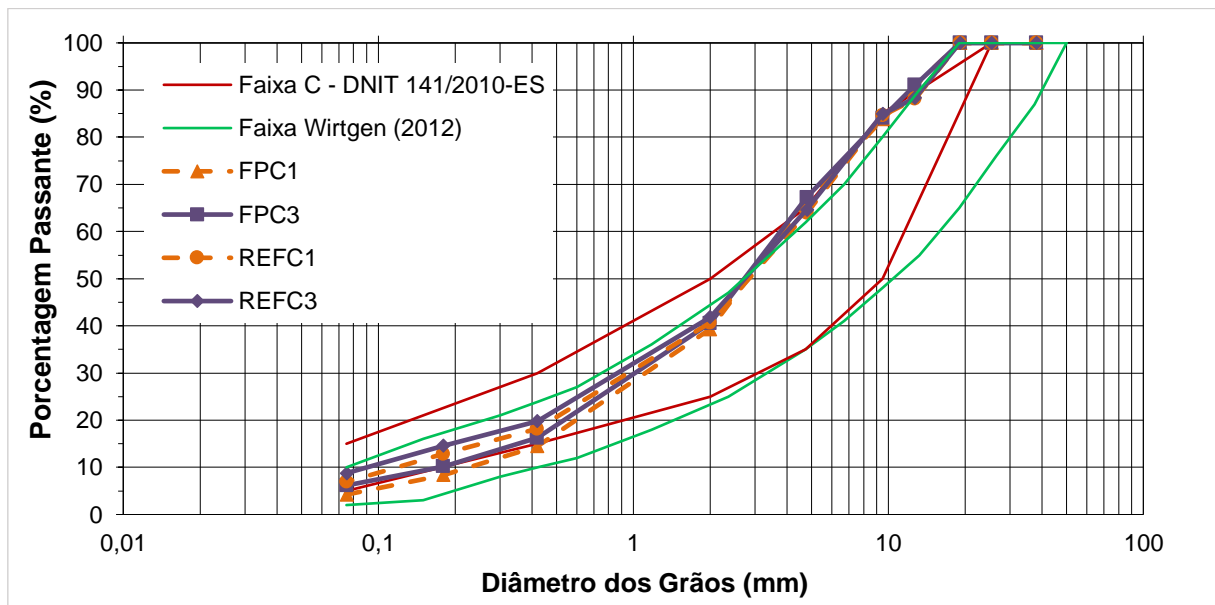
O fresado asfáltico é estabilizado com pó de pedra para seu enquadramento na faixa brasileira C do DNIT – ES 141 (DNIT, 2010a) devido a deficiência de finos no RAP em sua composição granulométrica, como já relatado no Capítulo 2. Buscou-se também inserir as porcentagens das misturas dentro da faixa do manual da empresa alemã Wirtgen (2012). Foi utilizada, para a mistura reciclada, a relação de massa 70% fresado e 30% pó de pedra, percentual que já foi estudado por diversos outros autores (PASCHE, 2016; TANSKI, 2016; SILVA, 2018; ROLIM, 2020).

A Tabela 14 apresenta os resultados das composições granulométricas das misturas propostas e a Figura 10 apresenta as respectivas curvas granulométricas.

Tabela 14 – Granulometria das misturas propostas

Peneira	mm	Mistura			
		REF (C1)	REF (C3)	FP (C1)	FP (C3)
1"	25,40	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,10	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	88,10	88,40	90,90	91,06
3/8"	9,50	84,60	84,90	83,80	84,12
nº 4	4,80	63,90	64,60	66,60	67,24
nº 10	2,00	40,70	41,90	39,30	40,52
nº 40	0,42	18,10	19,80	14,50	16,22
nº 200	0,08	6,90	8,80	4,20	6,15

Figura 10 – Curvas granulométricas das misturas enquadradas nas respectivas faixas



Fonte: Autora.

Para a composição da mistura de referência de agregados naturais, utilizaram-se frações de agregados 3/4", 3/8" e pó de pedra como forma de modificação do material fresado por material virgem. Para que não ocorresse a influência dos resultados da granulometria nas misturas, buscou-se o enquadramento de forma mais aproximada a granulometria da mistura referência junto a mistura com material fresado, conforme exercido por Silva (2018) e Rolim (2020). As porcentagens

de agregados naturais utilizados para enquadramento foram: 16% de brita 3/4", 24,50% de brita 3/8" e 59,50% de pó de pedra.

### 3.3.2 Compactação para determinação da umidade ótima das misturas

Com os materiais caracterizados iniciou-se o processo de dosagem das misturas asfálticas. Neste caso, a dosagem é a quantificação da água que é preciso adicionar às misturas, de forma a garantir a sua umidade considerada ótima de compactação para a obtenção da maior massa específica aparente seca do material, procedimento bem conhecido e similar ao de compactação de solos e materiais granulares.

Foi realizada uma curva de compactação para cada mistura e assim se teve o resultado de todas as propostas, com os cinco pontos diferentes de umidades exigidos. A quantidade de água inserida na mistura é obtida através das umidades necessárias para a criação das curvas de compactação. Tanski (2016) não considerou a água contida na emulsão para criar as curvas de compactação, portanto, seguiu-se o mesmo procedimento. A Figura 11 ilustra o procedimento do ensaio de compactação para a obtenção das curvas.

Figura 11 – Ensaio de compactação Proctor



Fonte: Autora.

A norma utilizada para o ensaio foi a do DNIT – ME 164/2013 (DNIT, 2013a) e a energia de compactação foi a modificada (de 55 golpes do soquete padrão em cada camada de compactação) para que fosse possível o alcance de densidades mais

elevadas. Após a obtenção de todos os pontos da curva de compactação, foram feitos os cálculos previstos em norma, tornando possível a construção da curva e a partir de então, efetuar a identificação da umidade ótima e a massa específica aparente seca.

Aquelas amostras empregadas na curva de compactação das misturas e determinação da umidade ótima de compactação e densidade, não puderam ser reaproveitadas, pois na decorrência do processo de compactação, que ocorreu sob energia modificada, houve a fragmentação do RAP. Sendo assim, para cada teor de umidade da curva de compactação foi necessário utilizar novos materiais, devido a possível mudança de granulometria durante o processo.

### **3.3.3 Moldagem e cura dos corpos de prova para ensaios mecânicos**

Após o processo de realização das curvas de compactação, foi definido o teor de umidade ótima para cada uma das misturas. Com isso, foi possível calcular a massa necessária para compor cada amostra, para que estas fossem submetidas aos ensaios mecânicos. Os volumes foram constantes para cada molde de ensaio, porém variam de acordo com a mistura, e a densidade é o parâmetro que norteia a pesquisa.

Para o ensaio de MR e RT foram moldados corpos de prova com dimensões de 10 cm de diâmetro por 6,50 cm de altura, utilizando os moldes ilustrados na Figura 12a. Buscou-se, de tal forma, um processo de melhor coesão entre as partículas, inserindo as amostras dentro dos moldes na estufa por 24 horas (iniciais) à 60°C (Figura 13) pois, de acordo com a bibliografia, a cura somente em ambiente não obtém a evaporação da água da emulsão de maneira satisfatória, o que dificulta a remoção das amostras dos moldes sem deformar. Após as 24 horas as amostras foram desmoldadas e o processo de cura seguiu em sala fechada, com temperatura ambiente, até completar-se os 28 dias de cura totais.

As amostras de RCS possuíam dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura e o molde utilizado para as moldagens deste ensaio é representado na Figura 12 (b). Estes corpos de prova permaneceram mais tempo de cura em estufa, fixado em 48 horas (iniciais) à 60°C para retirada dos moldes (Figura 13). Após esse período inicial, as amostras foram desmoldadas e posicionadas na cura em temperatura ambiente, em sala fechada, até que completassem os 28 dias de cura totais. Todas as amostras foram devidamente identificadas, com suas medições aferidas (altura e diâmetro em três medições diferentes) e a pesagem realizada.

De forma a acrescentar nos resultados e ampliar o banco de dados da pesquisa, um outro conjunto de amostras foi curada em câmara úmida. Nestes casos, após a moldagem dos corpos de prova, o total de dias de cura para os ensaios também eram de 28, a contar pela data de inserção na câmara úmida, permanecendo nos moldes pelos dois dias iniciais, para que, com isso, os mesmos não se degradassem no momento da desmoldagem. Após esses dois dias iniciais, desmoldaram-se os corpos de prova e os mesmos retornavam para a câmara úmida, e lá permaneciam até o final da idade de cura para os ensaios.

É importante ressaltar que as curas foram pensadas em duas etapas, na etapa da hidratação do cimento, e, por isso da cura úmida e também na etapa da evaporação da emulsão para melhor envolvimento dos materiais, e, por isso utilizou-se a estufa.

Figura 12 – Moldes cilíndricos para a pesquisa – (a) Ensaio de RT/MR; (b) Ensaio de RCS



Fonte: Autora.

Figura 13 – Amostras moldadas curando em estufa à 60°C



Fonte: Autora.



Inicialmente, o processo de moldagem seria manual, com o auxílio de bandejas. Entretanto, como já relatado, a amostra não ficava homogeneizada suficientemente, além de não ter otimização e tempo hábil para sua execução. Então, a confecção das amostras ocorreu mediante utilização da betoneira, seguindo os passos a seguir: imprimação da betoneira, adicionava-se o material granular (gráúdo e depois miúdo), o teor do cimento, a água necessária já calculada e, por fim, a emulsão asfáltica já pesada. O tempo de agitação da betoneira foi de cinco minutos, contados após a adição da água, zelando para que a agitação da mistura no momento da inserção da emulsão não ultrapassasse um minuto. Portanto, quatro minutos eram destinados à agitação da mistura, seguidos de um minuto de agitação após adicionar a emulsão.

Durante o procedimento de compactação das amostras, a betoneira era coberta com um pano úmido para evitar a perda da umidade das misturas. A cada porção de material retirado da betoneira para fazer uma amostra, a mesma era religada por dois giros, a fim de misturar o material novamente. Devido a heterogeneidade no desempenho laboratorial destas misturas, adotou-se a confecção de betonadas por mistura de acordo com cada ensaio individualmente. A litragem mínima e máxima da betoneira bem como o tempo hábil de moldagem foram respeitados. A Figura 14 demonstra os processos seguidos para moldagem das amostras.

Figura 14 – Equipamentos utilizados para confecção das amostras



Fonte: Autora.

O intervalo de tempo entre o instante em que a umidade era adicionada à mistura até o término da moldagem, não foi superior a três horas e seguiu o prescrito pela norma do DAER – ES 11/91 (DAER, 1991).

Para as amostras maiores referentes ao ensaio de RCS, o suporte de moldagem não encaixou no compactador Marshall mecânico, necessitando realizar a adaptação do suporte para encaixe do molde destinado as amostras de RCS, conforme Figura 15a. Já a Figura 15b demonstra as amostras compactadas no molde e a Figura 15c a amostra desmoldada.

Figura 15 – Equipamentos e amostras de RCS



Fonte: Autora.

A compactação das amostras demonstradas foi dividida em três camadas iguais, melhorando a distribuição dos agregados na amostra, pois em camada única a região inferior não recebe a mesma energia de compactação. Assim sendo, buscando a melhor aderência entre as camadas compactadas, foram realizadas algumas ranhuras na face compactada antes de partir para a próxima camada. Para as moldagens dessas amostras foram distribuídos golpes na faixa de 40 a 50 golpes por camada, baseando-se na altura da amostra e compactação de todo o volume da mistura para 1 CP.

O soquete Marshall foi utilizado para a compactação, mas o controle de golpes baseou-se na altura da amostra, ou seja, parou-se a compactação após todo o material da mistura estar inserido no molde. Para as amostras de RT/MR foi utilizado o compactador Marshall mecânico, em camada única. Com os golpes propostos por

norma (75 golpes por face) conseguiu-se atingir a altura necessária para as amostras. A Figura 16 ilustra as amostras destinadas ao ensaio de RT/MR.

Figura 16 – Equipamentos e amostras de RT/MR



Fonte: Autora.

### 3.3.4 Método de Ensaio

Nesta seção apresentam-se a metodologia para os ensaios das amostras e algumas características importantes.

#### 3.3.4.1 Resistência à Compressão Simples (RCS)

O ensaio de RCS é imprescindível tratando-se de análises com a utilização de materiais reciclados com adições cimentícias, devido a sua fácil realização e a periodicidade com que é empregado em inúmeras pesquisas relacionadas ao assunto, além de proporcionar a fácil comparação de resultados (KLEINERT, 2016).

De acordo com a NBR 12770 (ABNT, 1992), o ensaio determina a resistência a compressão simples sem confinamento lateral de uma amostra de solo, e é definida como a carga máxima em que ocorre rupturas ou deformação do material. Ainda, este ensaio pode ser realizado por deformação controlada, isto é, monitora-se a velocidade de deformação da amostra, medindo a carga aplicada que corresponde à essa deformação, ou também por carga controlada, em que se mede a deformação. Entretanto, de acordo com Silva (2018) e Tanski (2016), não existem especificações para realizar esse ensaio com material reciclado, por isso, segue-se os procedimentos gerais prescritos pela norma do DNER – ME 180 (DNER, 1994e).

Utilizam-se também alguns parâmetros da norma de BGTC, a NBR 11803 (ABNT, 2013b). Com isso, a resistência a compressão simples do corpo de prova é calculada, representando a divisão da carga de ruptura pela seção transversal do corpo de prova, conforme a equação 2.

$$RCS = \frac{F}{\pi \cdot d^2}, \quad [2]$$

em que:

RCS = Resistência à Compressão Simples (MPa);

F = Carga de ruptura (N);

d = Diâmetro do corpo de prova (cm).

No estudo de Silva (2018), as amostras foram capeadas para o ensaio de RCS com argamassa de 50% cimento Portland CP V – ARI e 50% de argamassa pronta da marca Votorantim com espessura de aproximadamente 3 mm. Conforme o descrito pelo autor, as tensões são melhores distribuídas em sua face de contato ao pistão da prensa. Para a determinação da RCS nesta pesquisa, foram moldados corpos de prova com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, moldados em condições de umidade ótima. Para esse ensaio, foi seguido o mesmo procedimento exercido por Silva (2018) e feito o capeamento das amostras, de modo a uniformizar as bases superiores e inferiores da amostra (Figura 17).

Figura 17 – Amostras de RCS capeadas com 3mm de argamassa



Fonte: Autora.

Para a compactação das amostras foi empregada a energia de compactação de Marshall expostas ao tempo de cura de 28 dias. O controle de golpes nessa moldagem foi baseado no alcance de altura das camadas. Neste ensaio, o corpo de prova cilíndrico precisou ficar posicionado na prensa, de modo que, quando

centralizado, seu eixo coincida com o plano em que a carga é aplicada, proporcionando uma resultante de forças passando pelo seu centro.

### 3.3.4.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)

Outro ensaio para avaliação da resistência mecânica, é o ensaio de resistência a tração por compressão diametral (RT), seguindo o prescrito pela norma nº 136 (DNIT, 2018a). Este método descreve o meio pelo qual se determina a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas betuminosas, através do ensaio de compressão diametral. O corpo de prova para o ensaio pode ser obtido diretamente na pista, por extração com sonda rotativa ou moldado em laboratório (DNIT, 1998). A equação 3 representa o cálculo da resistência (RT).

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad [3]$$

em que:

$\sigma_R$  = resistência à tração, à temperatura do ensaio, em MPa;

F = carga do de ruptura, em N;

D = diâmetro do corpo de prova, em mm;

H = altura do corpo de prova, em mm.

O ensaio consiste em aplicar uma carga vertical, distribuída em friso curvo, no corpo de prova cilíndrico, até que ocorra o rompimento no diâmetro vertical, devido à tração. A obtenção dos valores de RT das amostras ensaiadas foi alcançada através da aplicação da Equação 3. A Figura 18 apresenta a prensa que é dedicada para a realização desse ensaio e as amostras rompidas no equipamento.

Figura 18 – Prensa dedicada ao ensaio de RT e corpo de prova rompido



Fonte: Autora.

Para corpos de prova moldados em laboratório, a resistência a tração por compressão diametral é a média aritmética dos valores obtidos de pelo menos três amostras, desde que a variação entre os valores individuais e a média esteja em um intervalo de  $\pm 10\%$ . Devido a sua compreensibilidade, este ensaio de RT ou *Splitting Test* (IDT) é caracterizado como mais empregado para determinar a resistência a tração nos materiais cimentados (MEDINA; MOTTA, 2015).

#### 3.3.4.3 Módulo de Resiliência (MR)

A utilização da análise mecanicista vem sendo amplamente utilizada para projetos de pavimentos. Para tanto, há a realização de ensaios de deformabilidade substituindo os ensaios de resistência, que em geral é denominado MR de acordo com a norma nº 135 (DNIT, 2018c). O equipamento utilizado (Figura 19) possui uma estrutura metálica e um pistão que propicia o carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático junto a um regulador de tempo e frequência de 1 Hz. Por meio de um transdutor do tipo *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT), o corpo de prova sofre deformações horizontais, medidas por um microcomputador que faz o registro da deformação.

Figura 19 – Prensa UTM – 25 dedicada ao ensaio de MR e amostras sendo ensaiadas



Fonte: Autora.

Com os valores de carga aplicada e deslocamentos horizontais recuperáveis encontrados, é calculado o módulo de resiliência. O valor é resultante diretamente pelo *software* do computador, mas pode ser calculado pela equação 4.

$$MR = \frac{P}{\Delta X H} (0,9976 \times \mu + 0,2692) , \quad [4]$$

em que:

MR = módulo de resiliência (MPa);

P = carga vertical aplicada diretamente no corpo de prova (N);

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga (cm);

H = altura do corpo de prova (cm);

$\mu$  = coeficiente de Poisson.

#### 3.3.4.4 Ensaio de fadiga – Modo Tensão Controlada

A norma regulamentadora do ensaio de fadiga, tecnicamente conhecido como ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada é a DNIT 183/2018 – ME (DNIT, 2018b). Nela são estabelecidos os procedimentos para determinação do comportamento de misturas asfálticas quanto à fadiga sob um carregamento repetido, exposto a tensão constante, empregando o ensaio de compressão diametral de tração indireta.

A vida de fadiga à tensão controlada é calculada pela expressão 5.

$$N = k \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^n , \quad [5]$$

na qual o N é a vida de fadiga,  $\Delta\sigma$  é a diferença entre as tensões de compressão e tração no centro da amostra e o k e n são constantes determinadas a partir de resultados experimentais (GASPAR *et al.*, 2014).

É preciso pelo menos quinze corpos de prova dedicados ao ensaio com energia, teor de ligante e volume de vazios de projeto. Para estes corpos de prova, é necessário medir suas dimensões, massa específica aparente e verificar os volumes de vazios obtidos na moldagem em relação aos volumes de vazios especificado no projeto, com tolerância de 0,5%. As amostras devem ser acondicionadas em temperatura constante e de acordo com o tempo sugerido por norma.

De acordo com a norma brasileira DNIT 183/2018 – ME (DNIT, 2018b) para fadiga em misturas asfálticas, em suma, três corpos de prova são selecionados de forma aleatória, para obtenção da resistência à tração média. O restante dos corpos de prova é dividido em conjuntos para aplicar quatro níveis de tensões entre 5% e 40% da resistência à tração média, chamada de carga F. A frequência do ensaio é de

1Hz (0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundo de descarregamento) e utiliza como critério de parada a ruptura da amostra.

Contudo, em julho de 2021, o DNIT publicou a primeira normativa nacional referente ao ensaio de fadiga à tração por compressão diametral sob tensão controlada mediante utilização de materiais estabilizados quimicamente, tendo como nomenclatura DNIT 434/2021 – ME (DNIT, 2021). A norma apresenta como critério de parada de ensaio a ruptura total das amostras, frequência de aplicação de carga de 1 Hz, utilização de câmara úmida para atingir a idade de cura e coeficiente de determinação  $\geq 0,8$ .

Essa normativa indica também a utilização de três corpos de prova para quatro níveis de tensão, totalizando doze amostras para o ensaio, escolhidos entre 50% e 90% do valor da resultante da resistência à tração por compressão diametral da amostra. A vida de fadiga deve ser expressa em relação às tensões aplicadas comparadas à resistência à tração estática pelas equações 6 e 7.

$$N_{FAD} = 10^{(K_1 + K_2 * \%RF)} \quad [6]$$

$$\sigma t = \frac{2 * F}{\pi * d * t} \quad [7]$$

nas quais:

$N_{FAD}$  = Número de repetições de carga para ruptura da amostra;

$K_1$  e  $K_2$  = Parâmetros experimentais;

$\%RF$  = Razão entre tensão de tração aplicada ( $\sigma t$ ) e a resistência à tração por ruptura estática do material ( $\sigma r$ ), ambas em MPa;

$\sigma t$  = Tensão de tração aplicada (MPa);

$F$  = Força aplicada (N);

$d$  = Diâmetro da amostra (mm);

$t$  = Espessura da amostra (mm).

Ou, ainda, devem ser embasadas na deformação resiliente inicial. Entretanto é mais usual expressar a vida de fadiga em termos de tensões para materiais estabilizados quimicamente. Não há sugestões na normativa do DNIT 434/2021 – ME (DNIT, 2021) frente ao tipo de idade de cura para o ensaio, assim como orienta a moldagem individual dos CP's de forma a realizar o ensaio em idades aproximadas, evitando a distorção na avaliação dos resultados obtidos.

Os resultados provindos desse ensaio proporcionam a obtenção das curvas de vida de fadiga para que se possa prever o comportamento do pavimento a uma



dada tensão e mensurar quantas solicitações N ocorrerão antes da ruptura por fadiga. Se há os dados de tráfego para cada via, pode-se estimar o tempo de serviço dela. Estas curvas de fadiga podem ser informadas ao *software* de cálculo de pavimentos SisPavBR em concordância com o Novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa).

Contudo, a presente pesquisa é um dos estudos pioneiros no contexto do grupo de estudos e pesquisas GEPPASV, ao que se refere o comportamento à fadiga em materiais cimentados e emulsionados. Atrelando-se a inexistências metodológicas relacionadas às configurações e parâmetros adotados no ensaio de fadiga à tração por compressão diametral pelas normativas, optou-se pela reprodução de alguns procedimentos das normas citadas anteriormente. Back (2022) utilizou uma reprodução dos procedimentos desenvolvidos por Midgley e Yeo (2008), entretanto, com maior número amostral. Esse procedimento também foi observado para reprodução.

Para a execução desse ensaio foram moldados vinte corpos de prova na mesma betonada, para que houvessem amostras e resultados extras no caso de algum imprevisto. Algumas amostras não suportaram o carregamento e acabaram rompendo. A moldagem foi realizada e definida para a mistura com a maior resistência à tração por compressão diametral, que neste caso foi a mistura denominada FP C3E3, tendo em sua composição o material fresado e os maiores teores de cimento e emulsão incorporados, visando a análise do comportamento desta mistura.

O ensaio foi realizado através da prensa UTM – 25, da empresa IPC Global (Figura 22 da seção 3.3.4.3), disponível no laboratório. Antes de iniciar o ensaio, os corpos de provas foram condicionados na prensa, por pelos menos quatro horas, à 25°C, sendo ensaiados três CPs para cada nível de tensão aplicado, compreendidos entre 50% e 70% da RT previamente determinada.

Em seguida à aplicação dos primeiros dez ciclos de carregamento, que possuem finalidade de acomodar o sistema de medição do deslocamento, composto por dois sensores do tipo LVDT, inicia-se o alcance dos dados. Os deslocamentos foram considerados a cada quinze ciclos, adotando os últimos cinco a cada quinze para o cálculo da deformação resiliente inicial, até completar os sessenta ciclos. Nesse momento, os sensores LVDT foram retirados para que não fossem danificados pela carga e, a partir de então, o ensaio seguiu até a ruptura do corpo de prova e, com isso, obtiveram-se o número de ciclos aplicados.

### 3.3.5 Porosidade e teor volumétrico de cimento das misturas

Atualmente, o grupo de pesquisas da UFSM tem desenvolvido e vem desenvolvendo estudos na identificação de uma metodologia para dosagem de misturas a frio. Alguns estudos de BGTC já desenvolvidos por Silva (2018), Rolim (2020) e Back (2022) trazem considerações que consideram os tipos de materiais, quantidade de agente cimentante e porosidade presente nas misturas tanto de agregados naturais, como reciclados. Portanto, busca-se desenvolver nesse estudo, uma determinação simplificada da porosidade e teor volumétrico de cimento.

No estudo pioneiro realizado por Larnach (1960), a relação vazios/cimento (razão entre o volume de vazios de um CP e o volume total de cimento) apresenta uma correlação satisfatória de acordo com os valores obtidos nos ensaios de resistências. Foppa (2015) confirma que a RCS pode ser avaliada com excelente grau de precisão através da relação vazios/cimento. O autor sugere uma diferente expressão: a relação através da porosidade ( $\eta$ ) expressa em porcentagem, e teor volumétrico de cimento, expresso em porcentagem do volume de cimento total (C%), ou seja,  $\eta/C\%$ .

Assim, a presente pesquisa se propôs a utilizar tais índices de análise ( $\eta/C\%$ ), mediante confecção das amostras sob desempenho máximo, ou seja, moldadas nas umidades ótimas e densidades máximas. Nessa metodologia, o teor de cimento utilizado foi empregado em substituição da massa total da mistura e, portanto, a equação utilizada é adaptada com essa finalidade, de acordo com o realizado por Silva (2018). Desse modo, somam-se duas expressões, sendo, respectivamente, uma para as misturas de referência e outra para as determinações das misturas com RAP em sua composição,

$$\eta = 100 - \frac{100 \left\{ \left( \frac{(\gamma dV)(100 - \frac{c}{100}) (\frac{Brita\ 3/4''}{100})}{\gamma_{sBrita3/4''}} \right) + \left( \frac{(\gamma dV)(100 - \frac{c}{100}) (\frac{Brita\ 3/8''}{100})}{\gamma_{sBrita\ 3/8''}} \right) + \left( \frac{(\gamma dV)(100 - \frac{c}{100}) (\frac{PÓ}{100})}{\gamma_{sPÓ}} \right) + \left( \frac{(\gamma dV)(\frac{c}{100})}{\gamma_{sC}} \right) \right\}}{V} \quad \text{e} \quad [8]$$

$$\eta = 100 - \frac{100 \left\{ \left( \frac{(\gamma dV)(100 - \frac{c}{100}) (\frac{RAP}{100})}{\gamma_{sRAP}} \right) + \left( \frac{(\gamma dV)(100 - \frac{c}{100}) (\frac{PÓ}{100})}{\gamma_{sPP}} \right) + \left( \frac{(\gamma dV)(\frac{c}{100})}{\gamma_{sC}} \right) \right\}}{V}, \quad [9]$$

em que:

$\eta$  = Porosidade (%);

$\gamma d$  = Massa específica aparente seca da mistura ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\gamma_{sBrita\ 3/4''}$  = Massa específica aparente seca do agregado da Brita 1 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\gamma_{sBrita\ 3/8''}$  = Massa específica aparente seca do agregado da Brita 0 (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_{sPÓ}$  = Massa específica aparente seca do agregado pó de pedra (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_{sC}$  = Massa específica aparente seca do cimento (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_{sRAP}$  = Massa específica aparente seca do material fresado (g/cm<sup>3</sup>);

$V$  = Volume do corpo de prova (cm<sup>3</sup>);

$C$  = Teor de cimento (%);

$Brita\ 3/4''$  = Relação de porcentagem de B1 utilizada (%);

$Brita\ 3/8''$  = Relação de porcentagem de B0 utilizada (%);

$PÓ$  = Relação de porcentagem de PÓ utilizada (%);

$RAP$  = Relação de porcentagem de material fresado (%).

Para determinar a relação  $\eta/C\%$ , são utilizados os resultados obtidos pelas Equações 8 e 9, em conjunto com o teor volumétrico de determinado material constituinte de uma mistura, que pode ser calculado a partir da relação de seu volume com o volume total da amostra. Por conseguinte, calcula-se o teor volumétrico de cimento ( $C\%$ ) de cada corpo de prova com a expressão 10,

$$C\% = 100 \frac{V_c}{V} = 100 \frac{\left[ \frac{M_{cp}}{\left(1 + \frac{w}{100}\right)} \right] \left[ \frac{c}{100} \right]}{\gamma_{sc} V}, \quad [10]$$

utilizada na pesquisa para auxiliar na análise dos parâmetros de rigidez e resistência obtidos nos ensaios laboratoriais. Na equação,  $C\%$  é o teor volumétrico de cimento (%);  $V_c$  o volume de cimento (cm<sup>3</sup>);  $V$  o volume do corpo de prova (cm<sup>3</sup>);  $M_{cp}$  a massa do cimento do corpo de prova (g);  $w$  o teor de umidade do corpo de prova (%);  $C$  o teor de cimento (%) e  $\gamma_{sc}$  a massa específica aparente seca do cimento (g/cm<sup>3</sup>).

Destaca-se que os parâmetros de porosidade e teor volumétrico ( $C\%$ ) do cimento são frequentemente utilizados em estudos que utilizam materiais reciclados em sua composição. Por esse motivo, esses parâmetros são muito eficazes e ricos em métodos que envolvem diferentes energias de compactação, umidades de moldagem, bem como expressivas modificações granulométricas. Portanto, esses parâmetros tornam-se indicadores de desempenho que facilitam a adoção de misturas com ótimas propriedades mecânicas.

O presente estudo buscou utilizar o parâmetro de porosidade na tentativa de avaliação e análise da homogeneidade em função do acomodamento volumétrico das misturas moldadas em umidade ótima sob forma de vazios entre as diferentes amostras, e não utilizar os parâmetros encontrados para desenvolver uma

predisposição comportamental para cada mistura. O fator emulsão asfáltica não foi considerado individualmente nas equações e para o cálculo, portanto, foi considerado o teor de umidade total das misturas.

Por questões complementares será calculado o volume de vazios (Vv) das amostras pelo método de porcentagem de vazios de misturas asfálticas densas e abertas compactadas, da ARTERIS (T – 269 – 14, 2014). Por conseguinte, a expressão utilizada é a representada pela equação 11.

$$\%VV = 100 \left( 1 - \frac{A}{B} \right) \quad [11]$$

em que:

A = Massa específica aparente

B = Massa específica teórica máxima

Com esse cálculo obtém-se o percentual de vazios da mistura compactada. Os resultados são apresentados para cada mistura no Apêndice.

## 4 CONTRIBUIÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Espera-se que o presente trabalho contribua para a comunidade científica, no sentido de demonstrar as diferenças na utilização de agregados pétreos naturais e reciclados, destacando a possibilidade de reutilizar materiais oriundos da fresagem de pavimentos. Com isso, busca-se ampliar a base de dados, proporcionando uma maior informação durante uma pesquisa ou estudo científico, bem como reduzir os impactos ambientais e diminuir os custos rodoviários.

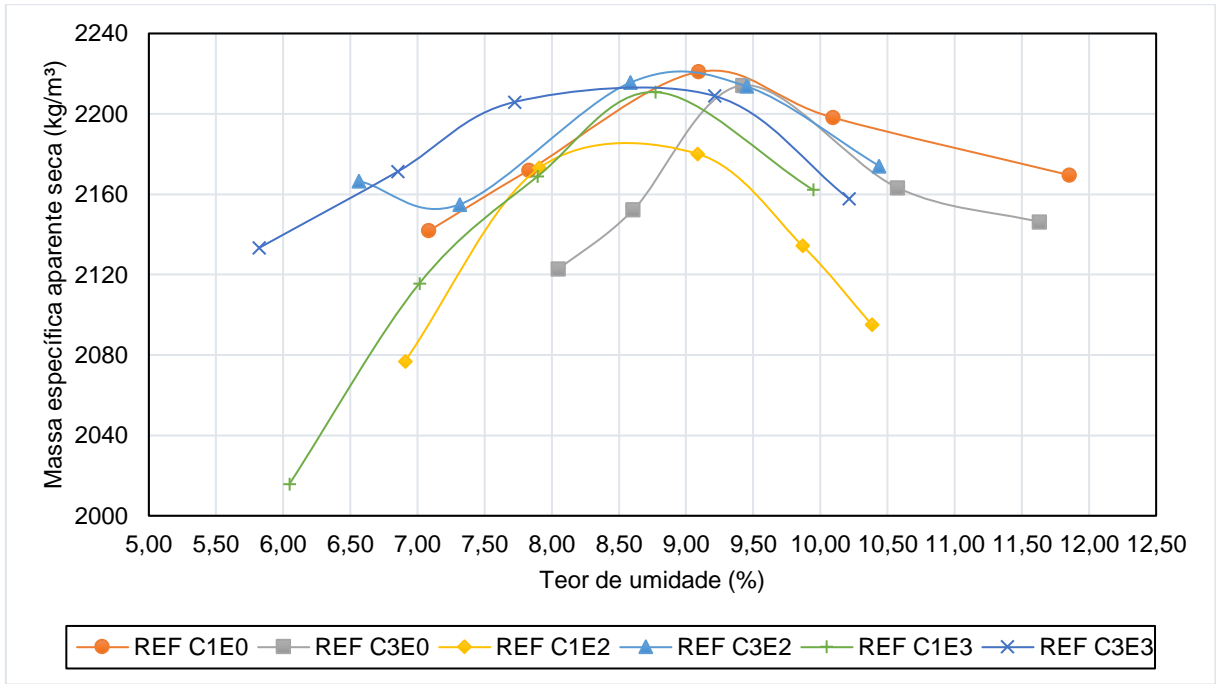
Para tanto, neste capítulo são abordados e analisados os resultados obtidos a partir da metodologia proposta. A primeira etapa trata de mostrar as curvas de compactação, seguidas pelos itens referentes aos ensaios de resistência, rigidez e um ensaio preliminar de fadiga. A cada item, apresentam-se os ensaios laboratoriais e as análises de variância de resultados e parâmetros propostos e, a partir de então, se apresentam as conclusões parciais dos respectivos itens.

Foram realizados testes estatísticos pelo método do Teste de Hipóteses “t” de Student, chamado de teste-t, comparando, em alguns casos, determinado grupo de amostras, a fim de verificar se há diferenças significativas entre eles utilizando o nível de significância de 5%. Esse método assume a hipótese de que a diferença entre os ensaios é nula ( $H_0=0$ ), ou seja, que a diferença entre os grupos analisados não é significativa, sendo para esse caso o resultado de que ‘não rejeita-se  $H_0$ ’. Por outro lado, no caso de diferenças significativas, resulta que ‘rejeita-se  $H_0$ ’. Foram confrontados os conjuntos de amostras que são comparáveis, a fim de responder os objetivos da pesquisa.

### 4.1 COMPACTAÇÃO E UMIDADES ÓTIMAS

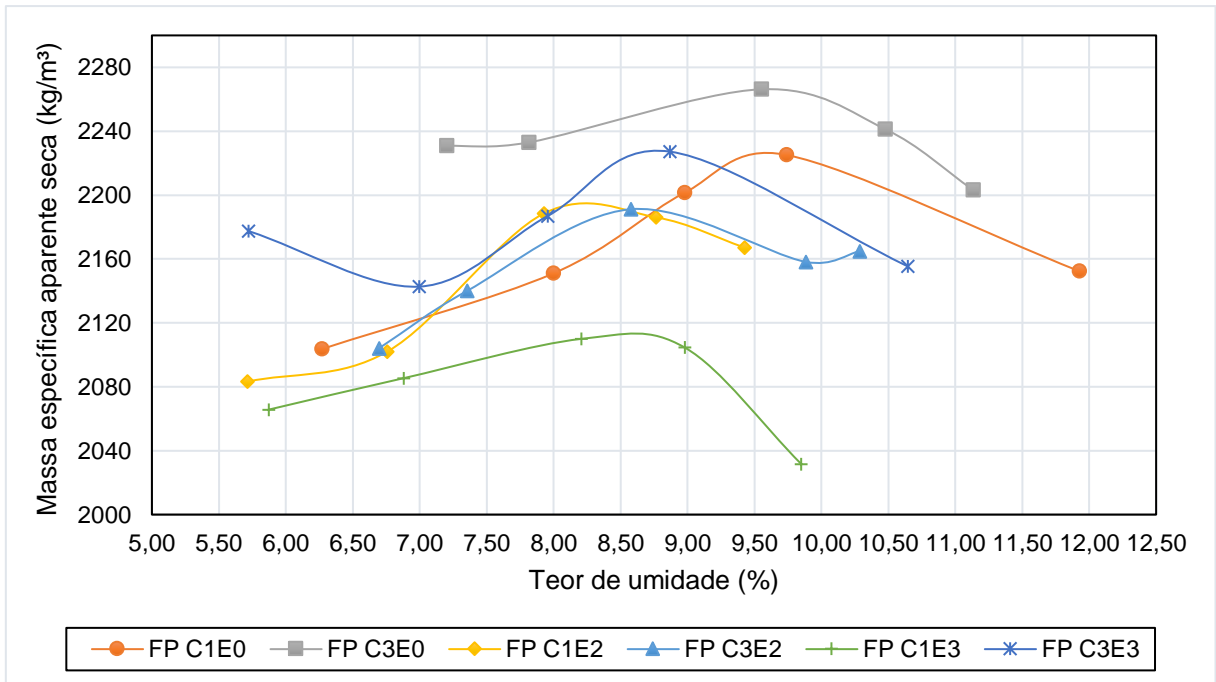
Devido a variabilidade de materiais, realizou-se uma curva de compactação para cada combinação de material, totalizando doze curvas de compactação. Todas as misturas foram submetidas ao processo de compactação Proctor modificado, de forma que as Figuras 20 e 21 exibem as curvas de compactação das referidas misturas, apresentadas em função de seu material. A porcentagem de umidade total encontrada nas curvas se refere a soma total de emulsão + água adicionada à mistura de agregados secos. Essa umidade encontrada no ensaio serviu de base para todas as moldagens do estudo.

Figura 20 – Curvas de compactação para as misturas de referência



Fonte: Autora.

Figura 21 – Curvas de compactação para as misturas recicladas



Fonte: Autora.

Em análise às curvas de compactação, os agregados apresentaram um comportamento distinto devido à variabilidade de combinações de materiais. O que se pode analisar, é que, para as mesmas misturas sem emulsão asfáltica, a massa

específica aparente seca teve uma queda com o aumento do teor de cimento de 1% para 3% e reduziu o teor de umidade.

Back (2022) encontrou um comportamento atípico para misturas de BGTC com agregado da mesma pedra (denominada DP) e o mesmo cimento, de forma que o aumento no teor de cimento promoveu leve aumento na massa específica seca máxima da mistura, havendo uma considerável redução da umidade ótima. Sagrilo (2020) empregou o mesmo material rochoso sob distribuições granulométricas distintas e obteve curvas de compactação em que as amostras com maior teor de finos exibiram o menor teor de umidade. Ressalta-se que todos os agregados naturais envolvidos nessa pesquisa são de mesma pedra. Sucintamente, a Tabela 15 apresenta as umidades ótimas e a massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) para cada uma das doze misturas.

Tabela 15 – Teores ótimos encontrados nas misturas

<b>Misturas realizadas</b>	<b>Umidade total (%)</b>	<b>Massa específica aparente seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>
REF C1E0	9,25 ± 2	2220
REF C3E0	9,40 ± 2	2215
REF C1E2	8,70 ± 2	2180
REF C3E2	9,00 ± 2	2215
REF C1E3	8,75 ± 2	2210
REF C3E3	8,75 ± 2	2210
FP C1E0	9,50 ± 2	2225
FP C3E0	9,50 ± 2	2265
FP C1E2	8,25 ± 2	2195
FP C3E2	8,60 ± 2	2190
FP C1E3	8,70 ± 2	2115
FP C3E3	8,75 ± 2	2225

Fonte: Autora.

De acordo com a Tabela 15, em condições numéricas, é possível identificar que as misturas com os mesmos teores de agentes estabilizadores demonstram certa similaridade. A densidade da mistura REF C1E2 de 2,180 g/cm<sup>3</sup> pode ser comparada com a mistura FP C1E2 de 2,195 g/cm<sup>3</sup> e teores de umidade de 8,70% e 8,25, respectivamente. Ainda, correlacionam-se as densidades das misturas REFC1E3 de 2,210 g/cm<sup>3</sup> e FP C1E3 de 2,115 g/cm<sup>3</sup> com umidades de 8,75% e 8,70%,

respectivamente. A densidade da mistura REF C3E2 de 2,215 g/cm<sup>3</sup> é comparada com a mistura FP C3E2 de 2,190 g/cm<sup>3</sup> e umidades de 9,00% e 8,60%, respectivamente. Por fim, correlaciona-se a densidade da mistura REF C3E3 de 2,210 g/cm<sup>3</sup> e a FP C3E3 de 2,225 g/cm<sup>3</sup> e mesmo teor de umidade (8,75%).

A literatura assinala que, para misturas que possuem o mesmo tipo de agregado e a mesma granulometria, nas quais varia apenas o teor de cimento, maior deverá ser o teor de umidade obtido e menor a densidade, à medida que haja um aumento no teor de cimento (ARANHA, 2013; BACK, 2022). Todavia, em algumas misturas, apenas o teor de umidade se enquadra nesta perspectiva, enquanto as densidades obtiveram um comportamento contrário. Essa diferença nas densidades pode ser justificada pelo percentual de emulsão inserido nas misturas e também a alteração do equilíbrio da hidratação do cimento. Além disso, precisam ser consideradas a porosidade da rocha e a quantidade de material miúdo existente.

Em comparação à variação da emulsão asfáltica, pode-se perceber que, à medida que se aumentou a porcentagem de emulsão, a porcentagem de umidade total diminuiu, exceto para as misturas com menor agente cimentício. Nas misturas com fresado e 1% cimento, Tanski (2016) obteve um aumento da umidade ótima das misturas. Por exemplo, ao se aumentar o teor de emulsão de 2% para 3%, a umidade aumentou de 6,50% para 7,60% e a densidade aumentou de 1,975 g/cm<sup>3</sup> para 2,025 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

O ensaio de resistência a compressão simples indica certo comportamento da camada do pavimento relacionado ao cisalhamento, conseqüentemente ao afundamento de trilha de roda (ATR), isso pode ser um indicativo de deformação permanente (TANSKI, 2016). Foram realizadas comparações com dois tipos de cura (estufa e câmara úmida) nas misturas REF C1E2 e FP C1E2 para o ensaio de RCS, conforme o indicado pelas normativas AASHTO PP 86-20<sup>1</sup> (AASHTO, 2020) e NBR 5738 (ABNT, 2016b).

A Tabela 16 exhibe, resumidamente, os resultados de RCS médio (MPa) para cada mistura, com seus respectivos desvios padrão e coeficiente de variação (CV). Desse modo, a Figura 22 ilustra em um gráfico a relação da forma de cura e RCS médio (MPa). Foram aplicadas barras de erros de desvio padrão para o eixo y.

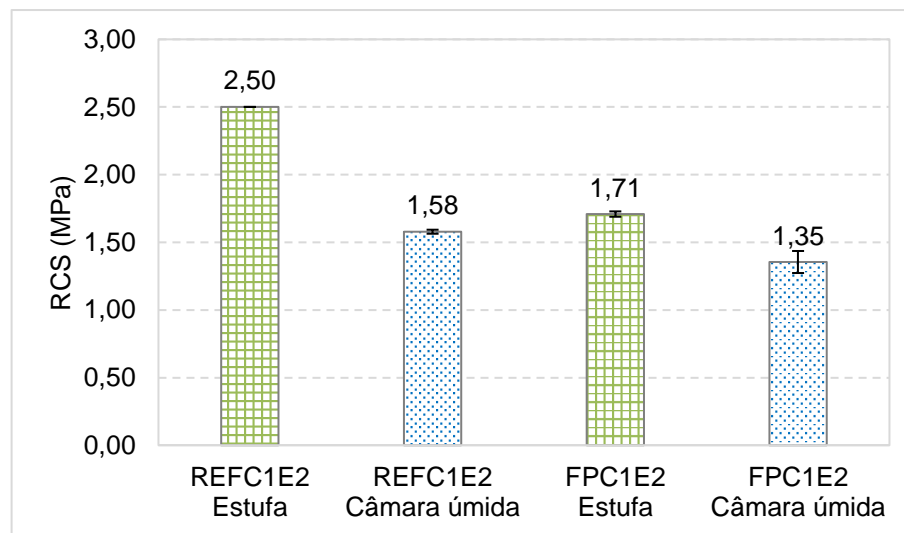


Tabela 16 – Resultados médios de RCS (MPa) em relação ao processo de cura

Mistura	Cura	RCS médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
REF C1E2	Estufa – 60°C	2,50	0,01	0,01
REF C1E2	Câmara Úmida	1,58	0,02	0,01
FP C1E2	Estufa – 60°C	1,71	0,08	0,05
FP C1E2	Câmara Úmida	1,35	0,05	0,04

Fonte: Autora.

Figura 22 – Relação da forma de cura e RCS (MPa) para quatro misturas selecionadas



Fonte: Autora.

Pode-se identificar que as misturas com 1% de cimento e 2% de emulsão asfáltica curadas em estufa são as que portam os resultados mais elevados de resistência à compressão simples. Em relação à cura, a estufa se sobressaiu, bem como em relação aos agregados, aquelas com agregados naturais se sobressaíram. Ao comparar a REF C1E2 e FP C1E2 curadas em estufa, a REFC1E2 apresentou resistência de 46,2% superior em relação à FP C1E2. Ao comparar a REF C1E2 e FP C1E2 curadas em câmara úmida, a REF C1E2 apresentou resistência de 17,04% superior em relação à FP C1E2.

Em relação às misturas de mesmos agregados e mesmas porcentagens de materiais estabilizadores, a mistura REF C1E2 (estufa) apresentou um resultado de RCS de 2,50 MPa e a mistura REF C1E2 (câmara úmida) apresentou um resultado de RCS de 1,58 MPa, o que representa uma redução de 36,8%. No tocante às misturas de fresado e pó de pedra, a mistura FP C1E2 (Estufa) obteve um RCS de

1,71 MPa e a mistura FP C1E2 (câmara úmida) resultou em um RCS de 1,35 MPa, o que representa cerca de 21,05% de redução. Sendo assim, a cura em estufa proporcionou uma crescente na resistência à compressão simples das amostras. De acordo com Pasche (2016), mesmo com pequenas adições de cimento, há ganhos de resistência bem consideráveis, salientando que o mesmo teor de cimento, em energia de compactação elevada, aumenta ainda mais a resistência.

O desvio padrão (MPa) e o coeficiente de variação (%) foram baixos, o que representa certa similaridade e pouca heterogeneidade entre os resultados encontrados no conjunto de amostras analisados. Contudo, não é possível verificar se as diferenças entre as misturas são ou não significativas. Por este motivo, realizou-se a análise estatística, por meio do teste-t, a fim de verificar se há diferenças significativas entre as misturas ou não, utilizando o nível de significância de 5%. Os grupos a serem confrontados foram escolhidos e divididos em apenas cura em estufa, apenas cura úmida e posteriormente estufa *versus* câmara úmida para REF e FP. Os resultados da análise estatística para os resultados médios de RCS em relação ao processo de cura utilizado são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Test-t para os resultados médios de RCS (MPa) em relação ao processo de cura

Hipótese de teste	H0 = 0 (iguais)	Alpha = 0,05		
<b>Grupos confrontados</b>	<b>Valor - t</b>	<b>Valor - P</b>	<b>Resultado</b>	
REF C1E2 x FP C1E2 (estufa)	0,06413	0,000078	Rejeita H0	
REF C1E2 x FP C1E2 (câmara úmida)	0,71711	0,000045	Rejeita H0	
REF C1E2 (estufa) x REF C1E2 (câmara úmida)	0,71594	0,00000035	Rejeita H0	
FP C1E2 (estufa) x FP C1E2 (câmara úmida)	0,11283	0,000294	Rejeita H0	

Fonte: Autora.

De acordo com a análise realizada, afirma-se, com 95% de assertividade, que existem diferenças significativas entre as médias. O grupo REF C1E2 (estufa) representa o maior valor, seguido de FP C1E2 (estufa), REF C1E2 (câmara úmida) e FP C1E2 (câmara úmida). A recomendação da norma brasileira para reciclagem com cimento no Brasil é que o teor de cimento para a dosagem de mistura reciclada deve ser definido pela resistência à compressão mínima de 2,10 MPa e máxima de 2,50 MPa, aos 7 dias de cura (DNIT, 2013b). Nesse caso, apenas a mistura REF C1E2 enquadrou-se nesse resultado, porém aos 28 dias de cura. Nas misturas recicladas

de Tanski (2016), encontrou-se para a mistura 2% emulsão e 1% cimento o maior valor de RCS aos 28 dias, sendo 1,41 MPa, valor inferior à 1,71 MPa obtido nessa pesquisa para a mistura FP C1E2 (estufa). Pires, Renz e Specht (2014) e Consoli *et al.* (2018) encontraram, aos 28 dias de cura, RCS de 2,15 MPa e 3,52 MPa para mistura de 70% fresado e 30% pó de pedra.

Na sequência, para o ensaio das demais misturas, o critério definido para as amostras foi curá-las em estufa, seguindo as recomendações das normativas PP 86-201 (AASHTO, 2020) e DNER – ME 107 (DNER, 1994c) para misturas asfálticas recicladas à frio com emulsão asfáltica e parte da norma NBR 5738 (ABNT, 2016b) para concretos. A opção por esse método de cura moveu-se pela empregabilidade, normativas vigentes, pesquisas já realizadas e demonstradas no Capítulo 2 desta Dissertação, e, ainda, por proporcionar a melhor cura nas misturas, conforme testes iniciais realizados. Para tanto, a Tabela 18 demonstra o resultado de RCS médio (MPa), desvio padrão (MPa) e coeficiente de variação (%) para cada mistura.

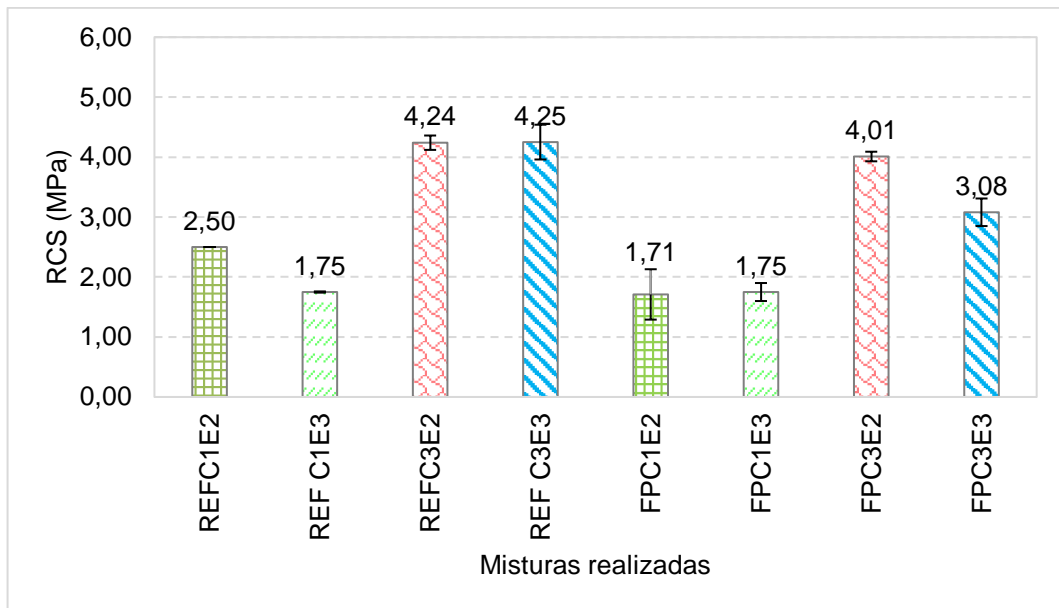
Tabela 18 – Resultados de RCS (MPa) médios

<b>Mistura</b>	<b>RCS médio (MPa)</b>	<b>Desvio padrão (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
REF C1E2	2,50	0,01	0,01
REF C1E3	1,75	0,12	0,07
REF C3E2	4,24	0,29	0,07
REF C3E3	4,25	0,42	0,10
FP C1E2	1,71	0,15	0,09
FP C1E3	1,75	0,08	0,04
FP C3E2	4,01	0,23	0,06
FP C3E3	3,08	0,39	0,13

Fonte: Autora.

Observa-se, através da Tabela 19 que, para os resultados das misturas de referência, houve um acréscimo de resistência ao passo que eram aumentados os teores de cimento e emulsão, com exceção da mistura REF C1E3, que diminuiu em relação à REF C1E2. Nas misturas de fresado, também houve acréscimo da RCS ao aumentar os teores de cimento e emulsão, exceto na mistura FP C3E3, que reduziu em relação à FP C3E2. Na Figura 23 ilustram-se os resultados obtidos para RCS para as oito misturas, os quais foram aplicadas barras de erros de desvio padrão para o eixo y.

Figura 23 – Resultados de RCS (MPa) médios para as misturas propostas



Fonte: Autora.

Os resultados de RCS encontrados exibem certa tendência em todas as misturas, considerando que todas as misturas REF apresentam resultados superiores às FP quando relacionadas com a mesma porcentagem de cimento e emulsão incorporados, exceto para as misturas REF C1E3 e FP C1E3, que obtiveram o mesmo resultado, não apresentando diferença no resultado. De acordo com a Figura 26, a mistura REF C1E2 é 31,6% superior à mistura FP C1E2 e a mistura REF C3E2 é 5,74% superior em relação à mistura FP C3E2. Por fim, a mistura REF C3E3 é 38% superior em relação à mistura FP C3E3.

O ganho de resistência dentro do mesmo percentual de cimento se deve às reações químico-físicas ocorridas na hidratação do cimento pozolânico. Tal reação provoca o ganho de resistência ao liberar a água em um período mais longo e lento (ROLIM, 2020). Em estudos anteriormente realizados, Fedrigo (2015) obteve resultados de 1,90 MPa a 2,03 MPa aos 7 dias de cura, para misturas com 70% de fresado incorporados e estabilização química com cimento, com teor fixo em 4%. Pires, Renz e Specht (2014) e Consoli *et al.* (2018) avaliaram a mistura 70% fresado e 30% pó de pedra e encontraram as resistências à compressão de 2,15 MPa e 3,52 MPa, respectivamente.

Ressalta-se que os maiores resultados de RCS obtidos no presente estudo são das misturas REF C3E3 e REF C3E2, seguidas da FP C3E2. Além disso, as

misturas compostas por diferentes teores de cimento exibem leve oscilação no balanço volumétrico (Back, 2022), portanto as misturas com teor de 3% são mais finas, fato que pode vir a interferir positivamente no desempenho mecânico das misturas. Na tentativa de elucidar se existem diferenças significativas ou não no desempenho mecânico das misturas foi realizado o test-t, conforme Tabela19.

Tabela 19 – Test-t para os resultados de RCS (MPa) médios para as misturas propostas

<b>Grupos confrontados</b>	<b>Valor - t</b>	<b>Valor - P</b>	<b>Resultado</b>
REF C1E2 x FP C1E2	0,06413	0,000078	Rejeita H0
REF C1E3 x FP C1E3	0,56082	0,994716	Não rejeita H0
REF C3E2 x FP C3E2	0,78323	0,316929	Não rejeita H0
REF C3E3 x FP C3E3	0,93960	0,024194	Rejeita H0
REF C1E2 x REF C1E3	0,02810	0,008212	Rejeita H0
REF C3E2 x REF C3E3	0,55148	0,960978	Não rejeita H0
FP C1E2 x FP C1E3	0,95053	0,000154	Rejeita H0
FP C3E2 x FP C3E3	0,49150	0,023702	Rejeita H0
REF C1E2 X REF C3E2	0,00510	0,001260	Rejeita H0
REF C1E3 X REF C3E3	0,16142	0,000578	Rejeita H0
FP C1E2 x FP C3E2	0,23140	0,000076	Rejeita H0
FP C1E3 X FP C3E3	0,07435	0,004570	Rejeita H0

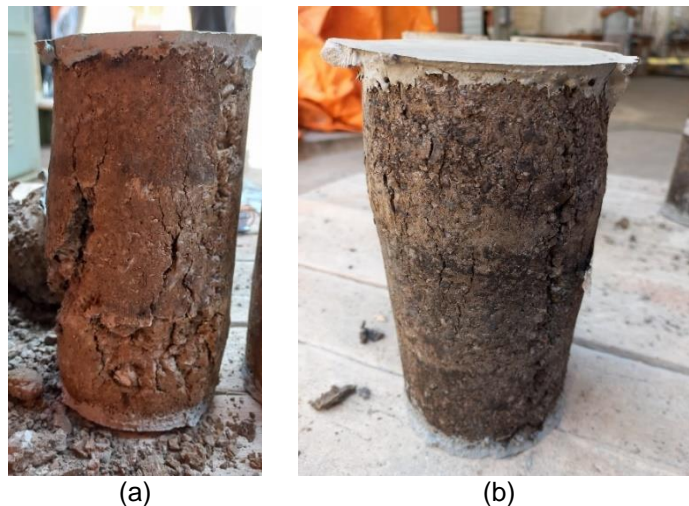
Fonte: Autora.

De acordo com os resultados alcançados por meio de análise estatística, percebe-se que, nas confrontações entre REF C1E3 e FP C1E3 e entre REF C3E2 e FP C3E2 não houveram diferenças significativas nos resultados. Isso representa que há possibilidade de se economizar na utilização de agregados provindos da jazida, aplicando o material reciclado. Nesse caso, os teores de cimento e emulsão se mantiveram os mesmos em cada confrontação. Portanto, cabe ressaltar, que o comportamento típico do aumento das RCS é devido ao aumento no teor de cimento, conforme observado nos resultados. Já na confrontação entre REF C3E2 e REF C3E3 também não se verificou diferença significativa. Neste caso, o teor de cimento é de 3%, porém o teor de emulsão varia entre 2% e 3%, conseqüentemente, pode-se optar pela utilização da mistura REF C3E2, já que a sua resistência foi compatível e se apresenta mais econômica, pelo fato de o teor de emulsão ser inferior.

Em relação ao modo de ruptura dos corpos de prova, de acordo com Foppa (2005), existem dois modos básicos de ruptura: a ruptura frágil e a ruptura dúctil. Na frágil, há uma queda rápida de resistência após alcançada a tensão desvio máxima, com a formação de planos de ruptura bem definidos. Nesse tipo de ruptura, se enquadram materiais muito rígidos como areias densas, argilas fortemente pré-adensadas e solos cimentados (em baixas tensões confinantes). Por outro lado, a ruptura dúctil é aquela que não apresenta queda significativa de resistência depois de atingir a máxima tensão desvio, nem apresenta formação de planos de ruptura bem definidos. Esse tipo de ruptura é característico de areias fofas e argilas moles (FOPPA, 2005).

A Figura 24a mostra um corpo de prova de referência que foi submetido à compressão simples e a Figura 24b mostra um corpo de prova FP, submetido à compressão simples.

Figura 24 – Amostras rompidas à compressão simples



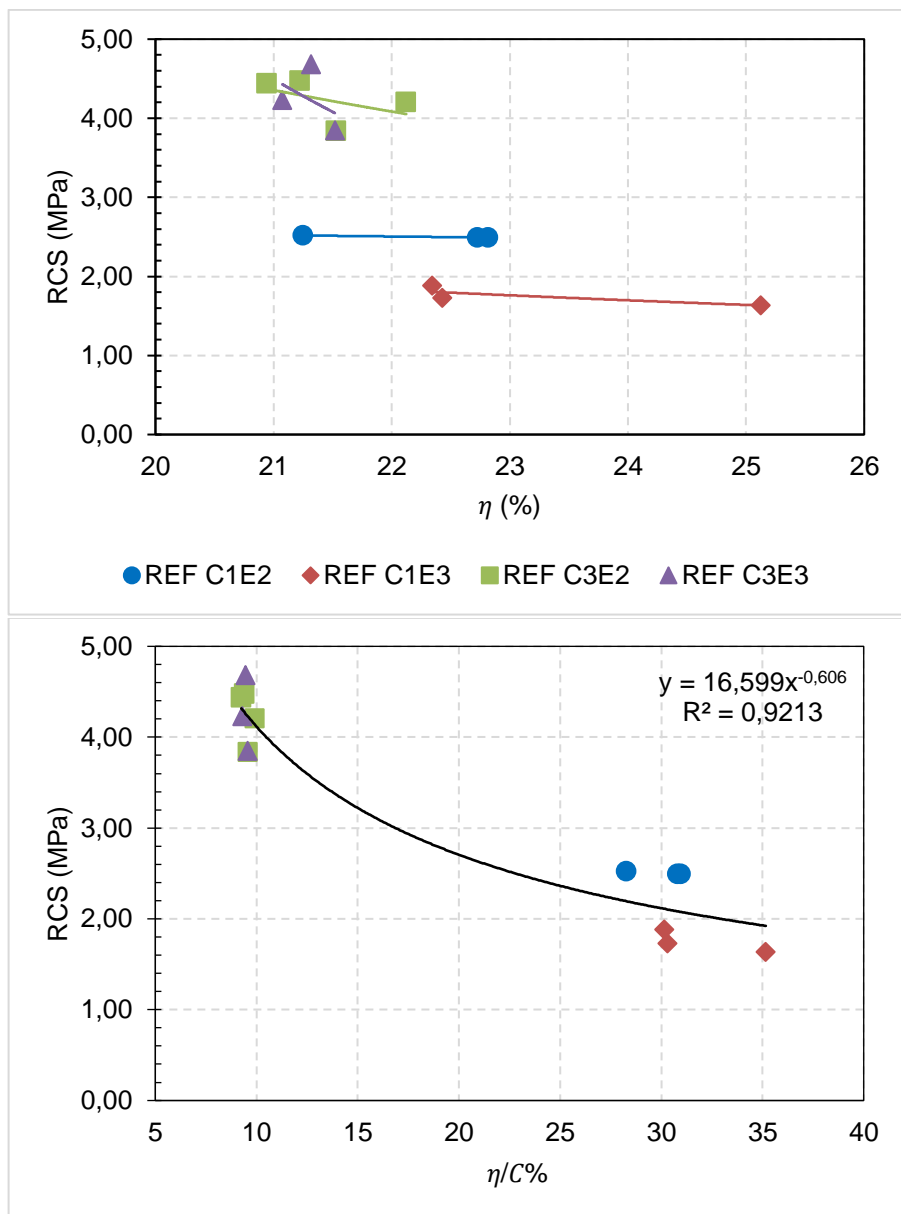
Fonte: Autora.

Durante o ensaio, observou-se um modo de ruptura mais frágil, com a formação de uma ruptura bem definida nas amostras. As misturas de referência sofreram um maior efeito na ruptura, principalmente naquelas com apenas 1% de cimento, enquanto que as amostras FP apresentaram uma ruptura mais lenta e dúctil, não havendo um plano de ruptura.

Apresentam-se, na Figura 25, as representações gráficas da relação entre a RCS em função da porosidade e índice “ $\eta/C\%$ ” para as misturas de referência e, na

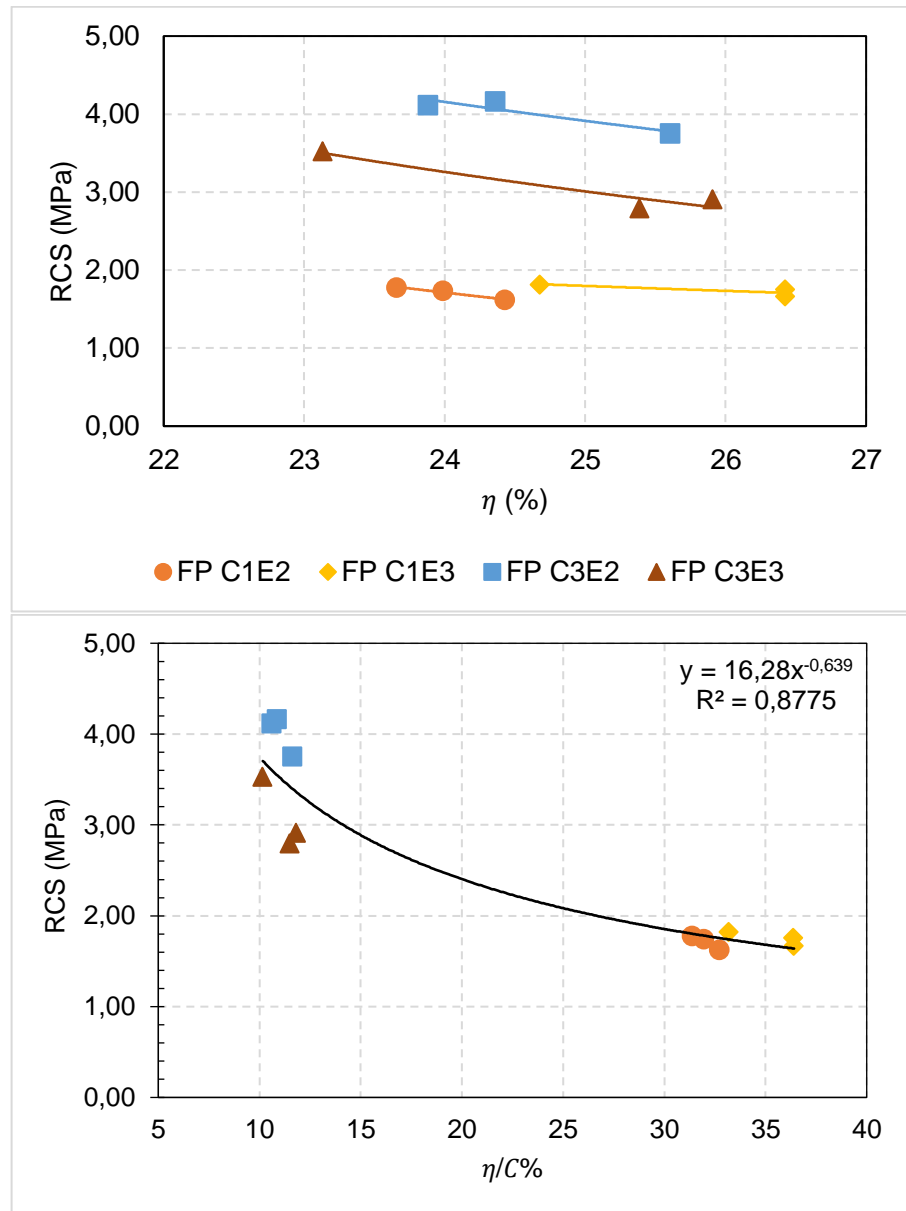
Figura 26, as representações gráficas da relação entre a RCS em função da porosidade e índice “ $\eta/C\%$ ” para as misturas com material fresado.

Figura 25 – Variação da RCS em relação à porosidade das misturas referência



Fonte: Autora.

Figura 26 – Variação da RCS em relação à porosidade e  $\eta/C\%$  para as misturas recicladas



Fonte: Autora.

É possível identificar que as misturas de referência com maiores valores de RCS (REF C3E2 e REF C3E3), exibam menores teores de porosidade e, as misturas com RCS menores, exibam maiores teores de porosidade em suas composições. De forma congênere, as misturas com os maiores teores de cimento também apresentaram níveis de porosidade muito próximos entre si, conduzindo à números de vazios muito similares. Ainda, a utilização do parâmetro de porosidade não é a única justificativa para os diferentes desempenhos mecânicos. O demonstrativo do volume de vazios se encontra no Apêndice.



Em relação às outras duas misturas de referência, houve maior divergência entre as porosidades, provavelmente ocasionada pelo menor teor de cimento, levando em consideração as mesmas quantidades de emulsão. Se tratando de termos numéricos, as amostras com maiores teores de cimento exibiram baixa porosidade em comparação à Silva (2018), que utilizando compactação Proctor modificada e curva granulométrica distinta obteve, em suas misturas, porosidades na ordem de 20%, o que fica mais similar às misturas com 1% de cimento desta pesquisa. Correlacionando as misturas de BGTC de Back (2022), com 3,5% de cimento (CP IV) e energia de compactação modificada, a autora obteve, aos 28 dias de cura, porosidades na faixa de 12% à 15%, que ficam mais similares com os resultados obtidos. Ressalta-se que Silva (2018) e Back (2022) não utilizaram a emulsão asfáltica em suas misturas.

No caso das misturas recicladas, observou-se maior variabilidade de resultados de porosidade em relação às misturas de referência, em que o aumento no teor de cimento não causou uma diminuição evidente da porosidade e sim um aumento na RCS. Conforme já relatado, é visado utilizar o parâmetro de porosidade, na tentativa de avaliar a homogeneidade em função do acomodamento volumétrico das misturas moldadas em umidade ótima, e com a mesma energia de compactação, sob formação de vazios entre as diferentes amostras e não os utilizar para uma propensão comportamental das misturas.

A porosidade nas misturas FP C3E2 e FP C3E3 ficaram mais espaçadas, assim como os resultados de RCS, possivelmente evidenciando um número de vazios distintos entre si, o que também pode ter ocasionado os diferentes resultados de RCS. Todas as misturas com o material fresado apresentaram porosidade na faixa de 23% à 27%. Esse resultado corrobora com o encontrado por Silva (2018) em suas misturas com a utilização do mesmo material fresado e cimento CP V (em 4%, 5% e 6%) o qual obteve porosidades entre 20% e 27%.

Já o índice  $\eta/C\%$  (porosidade/teor volumétrico de cimento) se mostrou eficiente na análise de RCS para ambos os casos, tanto nas amostras com agregados naturais como as com fresado, levando-se em consideração o nível de cimentação das diferentes misturas, exibindo o ajuste estatístico satisfatório e mantendo coerente as suas relações.

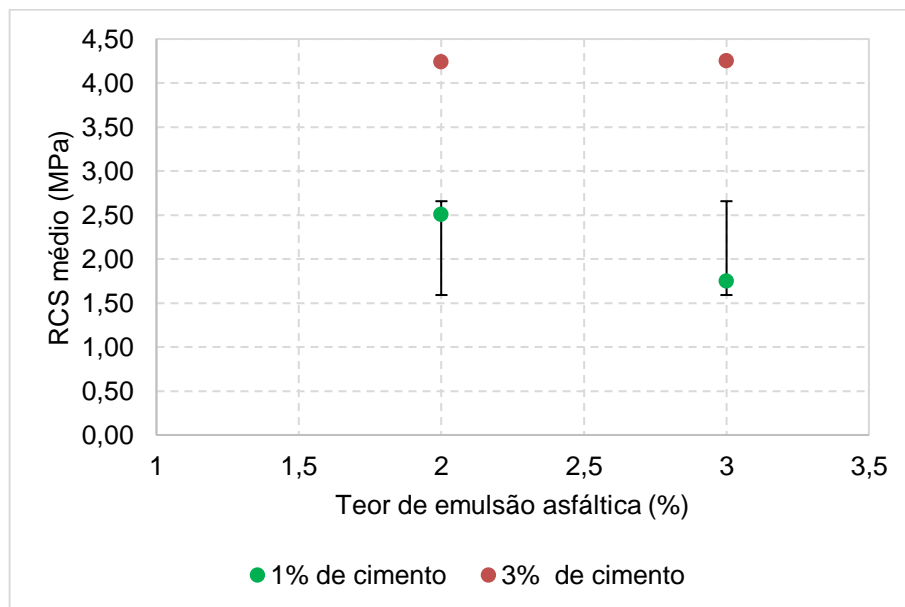
Resultados laboratoriais de Clought *et al.* (1981) confirmaram a literatura, ao concluir que o RCS aumenta linearmente com o aumento do consumo de cimento

Portland, e exponencialmente com a diminuição da porosidade da mistura compactada. Uma das principais razões para o aumento da taxa de ganho de resistência, é que há mais contatos entre partículas e, portanto, é mais provável que o cimento promova uma ligação efetiva nesses contatos (CHANG; WOODS, 1992).

#### 4.2.1 Efeito do teor de emulsão asfáltica nas misturas

A relação do teor de emulsão asfáltica e RCS é apresentada através de um gráfico de dispersão, pela Figura 27 para as misturas REF. Foram aplicadas as barras de erros considerando o desvio padrão para o eixo y, correspondente aos resultados de RCS médio de cada mistura analisada.

Figura 27 – Relação do teor de emulsão asfáltica (%) e RCS (MPa) para as misturas REF



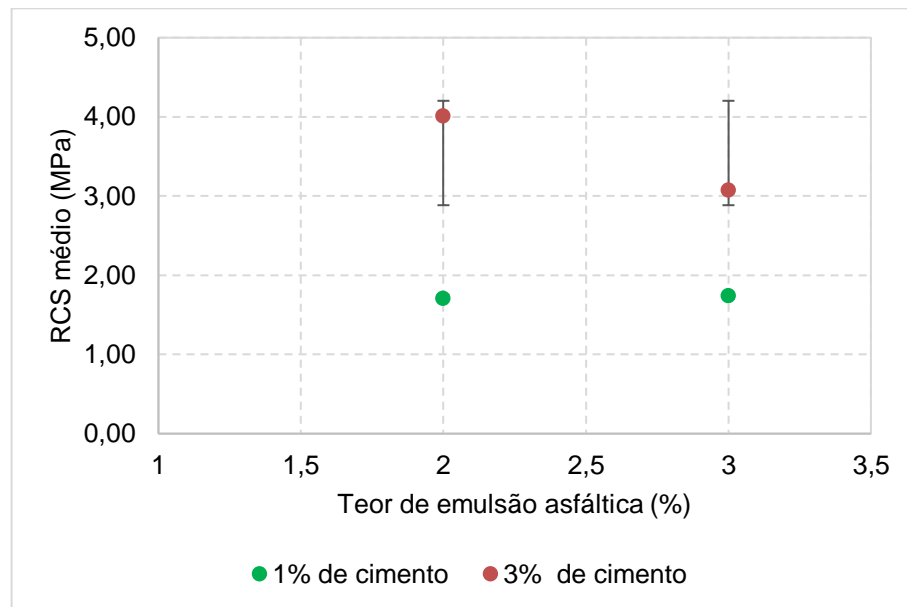
Fonte: Autora.

Isolando a variável cimento, para as misturas de referência, o teor de emulsão asfáltica de 3% foi pouco superior ao de 2%. No caso de 3% de cimento, deve-se levar em consideração que a diferença foi mínima e, de acordo com análise estatística, não é significativa. Por outro lado, no caso de 1% de cimento, o teor de emulsão apresentou um comportamento diferente, apresentando queda na resistência da mistura com 3% de emulsão em relação àquela com 2% de emulsão. Por

consequente, a maior diferença entre o acréscimo de um para o outro ocorreu para aquela com 1% de cimento.

A relação do teor de emulsão asfáltica e RCS é apresentada através de um gráfico de dispersão para as misturas FP (Figura 28). Foram aplicadas as barras de erros considerando o desvio padrão para o eixo y, correspondente aos resultados de RCS médio de cada mistura analisada.

Figura 28 – Relação do teor de emulsão asfáltica (%) e RCS (MPa) para as misturas FP



Fonte: Autora.

Nestas misturas de fresado e pó de pedra, verifica-se maior disparidade pois, aumentando o teor de emulsão asfáltica os resultados são opostos aos apresentados pelas misturas de referência. No caso de 1% de cimento, o aumento no teor de emulsão promove aumento de aproximadamente 2,34% na RCS. Em contrapartida, tratando-se de 3% de cimento o comportamento é inverso, a RCS apresentou uma queda brusca de aproximadamente 23,19% ao passar de 2% para 3% de emulsão. Contudo, esses resultados estão de acordo com o que foi encontrado na análise estatística, em que os resultados se mostraram significativamente diferentes.

Em relação a mistura reciclada, Tanski (2016) observou um comportamento semelhante em suas misturas, das quais destacou-se a mistura de 2% de emulsão e 1% de cimento (1,41 MPa). Em seguida, as resistências à compressão foram reduzindo simultaneamente ao aumento no teor de emulsão asfáltica, neste caso, nas

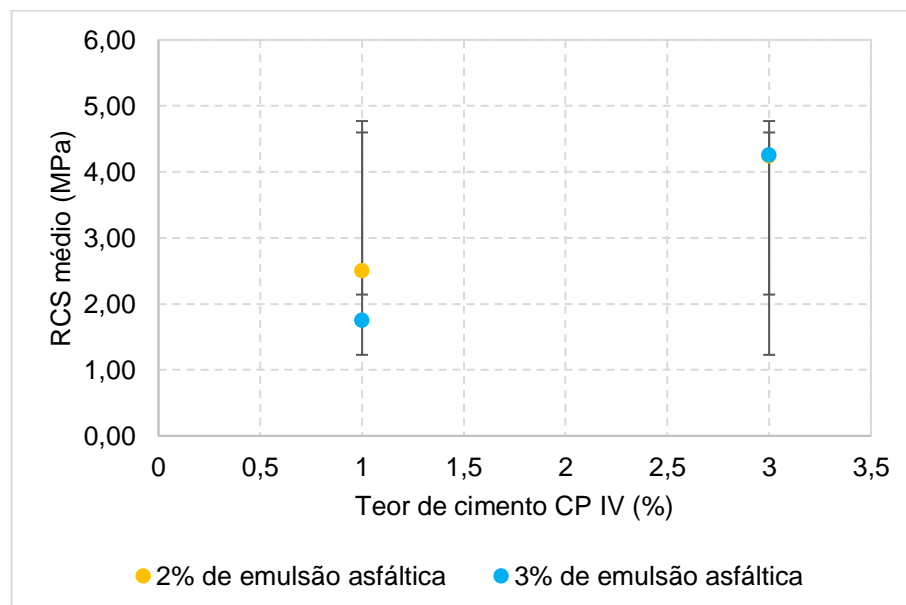
misturas subsequentes: 3% 1%, 4% 1% e 5% 1%, os resultados foram 1,07 MPa, 0,95 MPa e 0,88 MPa, respectivamente.

A Austroads (2002) destaca que a RCS pode ser menor que 1 MPa em misturas com 1% de cimento e entre 1 MPa e 4 MPa para misturas com 3% de cimento. É recomendado no Brasil que, para reciclagem com cimento, o teor aplicado para a dosagem da mistura reciclada deve ser definido pela resistência a compressão mínima de 2,1 MPa e máxima de 2,5 MPa aos 7 dias de cura (DNIT, 2013b). Portanto, os resultados aos 28 dias de cura, de forma geral, atendem as especificações e, além disso, os limites da Austroads (2002) foram superados.

#### 4.2.2 Efeito do teor de cimento Portland CP IV nas misturas

A relação do teor de cimento Portland e RCS é apresentada na Figura 29 por meio de um gráfico de dispersão, para as misturas REF. Foram aplicadas as barras de erros considerando o desvio padrão para o eixo y, correspondente aos resultados de RCS médio de cada mistura analisada.

Figura 29 – Relação do teor cimento CP IV (%) e RCS (MPa) para as misturas REF



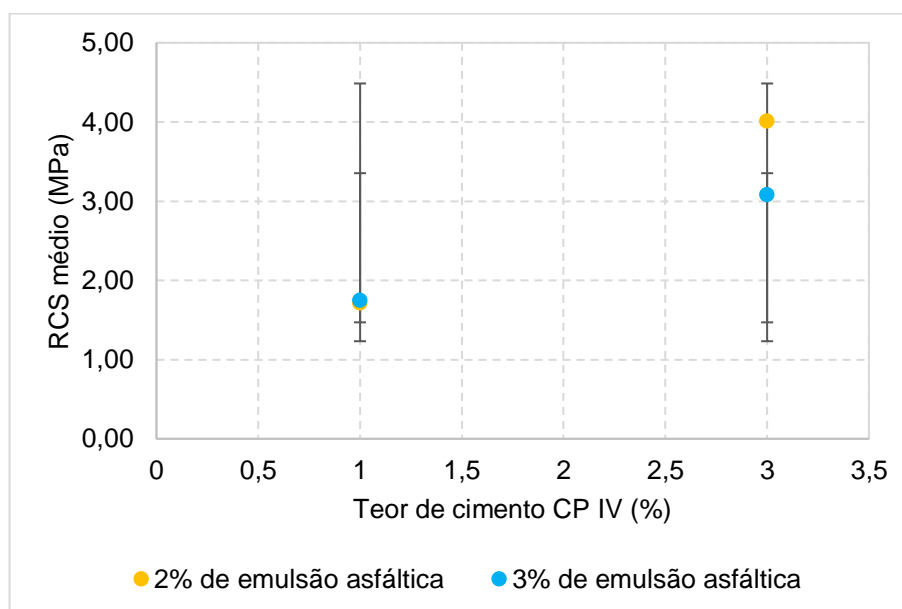
Fonte: Autora.

Isolando a emulsão asfáltica nas misturas REF, percebe-se que o teor de 3% de cimento foi superior ao de 1% em ambos os casos. Ao aumentar o teor de cimento

de 1% para 3%, nota-se que os resultados são quase idênticos, mesmo variando a emulsão asfáltica. Ou seja, as misturas REF C3E2 e REF C3E3 obtiveram praticamente o mesmo resultado, e a análise estatística comprova que não há diferenças significativas entre as médias. Quando comparadas as misturas de 1% para 3% de cimento e mesmo teor de emulsão, os valores passam de 2,50 MPa para 4,24 MPa, crescendo 69,6%, assim como as demais passaram de 1,75 MPa para 4,25 MPa, crescendo 142,86%. Por essa razão, também se confirma a diferença significativa, estatisticamente, entre essas misturas.

Visualiza-se a relação do teor de cimento Portland e RCS na Figura 30 em um gráfico de dispersão para as misturas FP. Foram aplicadas as barras de erros considerando o desvio padrão para o eixo y, correspondente aos resultados de RCS médio de cada mistura analisada.

Figura 30 – Relação do teor cimento CP IV (%) e RCS (MPa) para as misturas FP



Fonte: Autora.

Isolando a emulsão asfáltica nas misturas FP, percebe-se que o teor de 3% de cimento foi superior ao de 1% em ambos os casos, seguindo o mesmo comportamento das misturas de referência. Nas misturas com 1% de cimento, e alterando apenas a emulsão asfáltica, o valor passou de 1,71 MPa para 1,75 MPa e os pontos ficaram praticamente iguais. Apesar desse fato, é comprovado estatisticamente que as diferenças entre eles são significativas. Por outro lado, nas misturas com 3% de cimento, alterando a emulsão asfáltica, o valor passou de 4,01

(2% de emulsão) para 3,08% (3% de emulsão). Nesse caso, como o teor de cimento se manteve o mesmo, afirma-se que a presença da maior quantidade de emulsão influenciou mais na mistura do que o próprio cimento, comportamento semelhante ao encontrado por Tanski (2016).

Salienta-se que a análise estatística comprovou que existem diferenças significativas entre as médias devido a heterogeneidade dos resultados. Por exemplo, nas misturas de 1% de cimento com acréscimo de emulsão, o resultado passou de 1,71 MPa para 4,01 MPa (acrécimo de 134,5%). Com relação às misturas de 3% de cimento e 3% de emulsão, os resultados passaram de 1,75 MPa para 3,08 MPa, evidenciando um acréscimo de 76%.

Apesar desses fatos, é possível tendenciar os resultados de RCS, corroborando ao encontrado na bibliografia: conforme se aumenta o teor de cimento, o ganho de resistência à compressão simples observado é considerável. Pasche (2016), por exemplo, descreve que, ao elevar o teor de cimento de 3% para 7% em suas misturas, os resultados de RCS duplicaram.

#### 4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT)

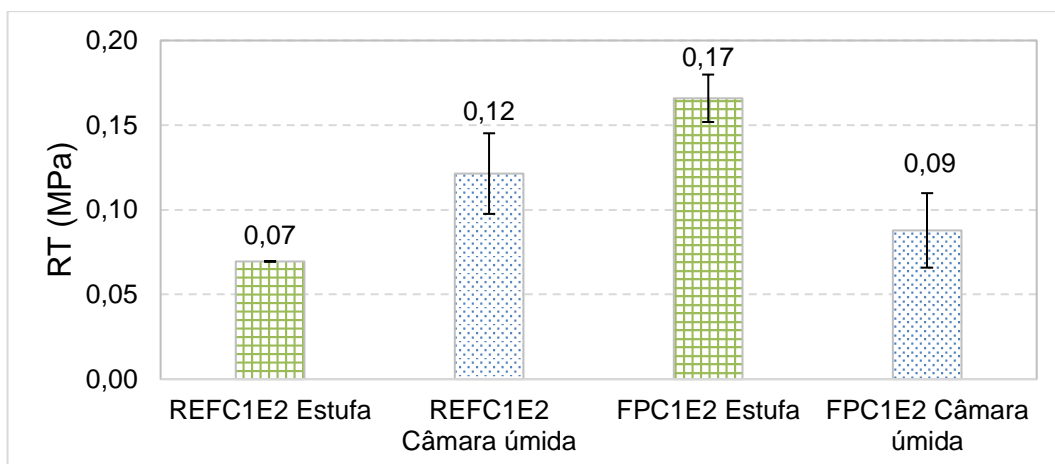
Foram realizadas comparações com dois tipos de cura (estufa e câmara úmida) nas misturas REF C1E2 e FP C1E2 para o ensaio de RT, conforme o indicado pelas normativas AASHTO PP 86-20<sup>1</sup> (AASHTO, 2020) e NBR 5738 (ABNT, 2016b). A Tabela 20 exhibe, resumidamente, os resultados de RT médio (MPa) para cada mistura, com seus respectivos desvios padrão e coeficiente de variação (CV). Desse modo, a Figura 31 ilustra em um gráfico a relação da forma de cura e RT médio (MPa). Foram aplicadas barras de erros de desvio padrão para o eixo y.

Tabela 20 – Resultados médios de RT em relação ao processo de cura

<b>Mistura</b>	<b>Cura</b>	<b>RT médio (MPa)</b>	<b>Desvio padrão (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
REF C1E2	Estufa – 60°C	0,070	0,0238	34,24
REF C1E2	Câmara úmida	0,121	0,0140	11,56
FP C1E2	Estufa – 60°C	0,166	0,0220	13,25
FP C1E2	Câmara úmida	0,088	0,0155	17,63

Fonte: Autora.

Figura 31 – Relação da forma de cura e RT para quatro misturas selecionadas

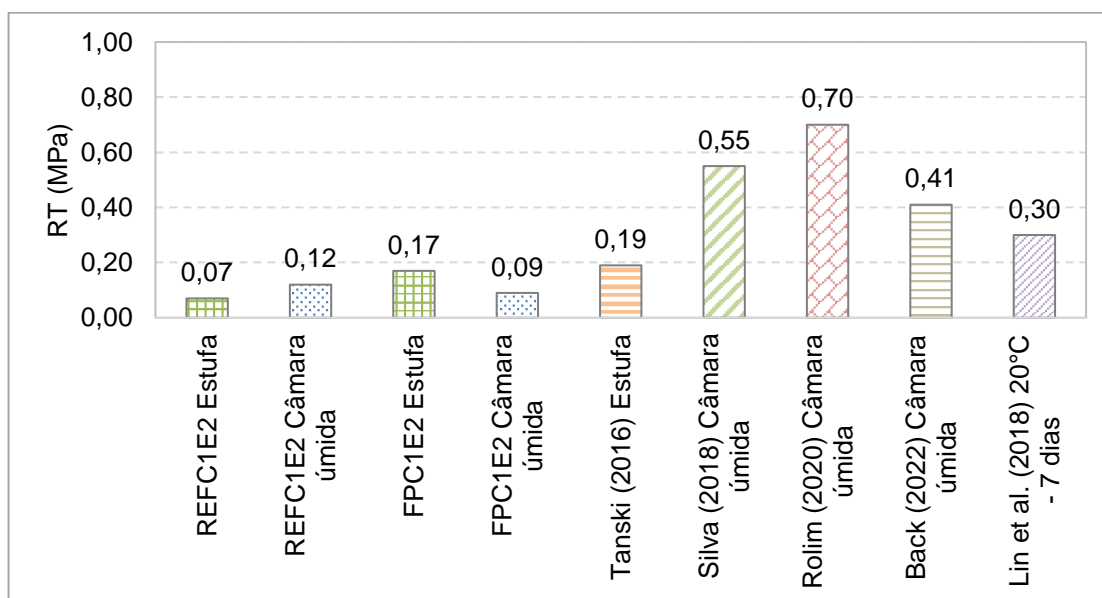


Fonte: Autora.

Com a mesma mistura de 70% fresado e 30% pó de pedra e mesmos teores de emulsão e cimento exibidas na Figura 34, Tanski (2016) encontrou uma RT de 0,19 MPa em sua pesquisa com o formato de cura em estufa e misturas de mesmos percentuais (1% de cimento e 2% de emulsão asfáltica). Em contrapartida, Pires (2014), em pesquisa com o material fresado e 50% de cinzas de casca de arroz encontrou valores na ordem de 0,26 MPa.

Na Figura 32 verificam-se algumas comparações de outras pesquisas com os resultados obtidos nas quatro misturas selecionadas.

Figura 32 – Comparativo com outras pesquisas relacionando a forma de cura e RT (MPa)



Fonte: Autora.

Silva (2018) e Rolim (2020) encontraram resultados de 0,55 MPa e 0,70 MPa em misturas apenas com material fresado e cimento, respectivamente. Ambas as pesquisas são de amostras curadas em câmara úmida, porém com porcentagens de agentes cimentícios superiores ao dessa pesquisa. A partir disso, realizou-se a análise estatística descrita anteriormente, por meio do teste-t, a fim de verificar se há diferenças significativas entre as misturas ou não, utilizando o nível de significância de 5%. A Tabela 21 apresenta a análise estatística para os resultados médios de RT em relação ao processo de cura utilizado.

Tabela 21 – Test-t para os resultados médios de RT (MPa) em relação ao processo de cura

Hipótese de teste	H0 = 0 (iguais)	Alpha = 0,05		
Grupos confrontados	Valor - t	Valor - P	Resultado	
REF C1E2 x FP C1E2 (estufa)	0,9025	0,00006947	Rejeita H0	
REF C1E2 x FP C1E2 (câmara úmida)	0,7623	0,005045	Rejeita H0	
REF C1E2 (estufa) x REF C1E2 (câmara úmida)	0,2305	0,0004853	Rejeita H0	
FP C1E2 (estufa) x FP C1E2 (câmara úmida)	0,5918	0,000555	Rejeita H0	

Fonte: Autora.

Perante a análise supracitada, confirma-se em 95% que há diferenças significativas nos grupos confrontados. A possível divergência nos comportamentos das misturas em relação a forma de cura está relacionada aos materiais envolvidos na mistura de forma total, visto que o agregado natural possui uma maior absorção. Por outro lado, a cura em estufa proporciona ao fresado e a emulsão asfáltica uma interação maior para o entrosamento dos agregados com o ligante (ABEDA, 2010). Outro fator que corrobora para esse comportamento, é a dificuldade no manuseio dos materiais envolvidos, pois tendência a uma heterogeneidade nas amostras após o processo de compactação.

Na sequência, para o ensaio das demais misturas, o critério definido para as amostras foi curá-las em estufa, seguindo as recomendações das normativas PP 86-20<sup>1</sup> (AASHTO, 2020), NBR 5738 (ABNT, 2016b) e DNER – ME 107 (DNER, 1994c). A escolha desse método de cura moveu-se pela empregabilidade, normativas vigentes, pesquisas já realizadas e demonstradas no Capítulo 2 desta Dissertação e também por proporcionar a melhor cura nas misturas, conforme testes iniciais realizados. Para tanto, a Tabela 22 demonstra o resultado de RT médio (MPa), desvio padrão (MPa) e coeficiente de variação (%) para cada mistura. Na Figura 33



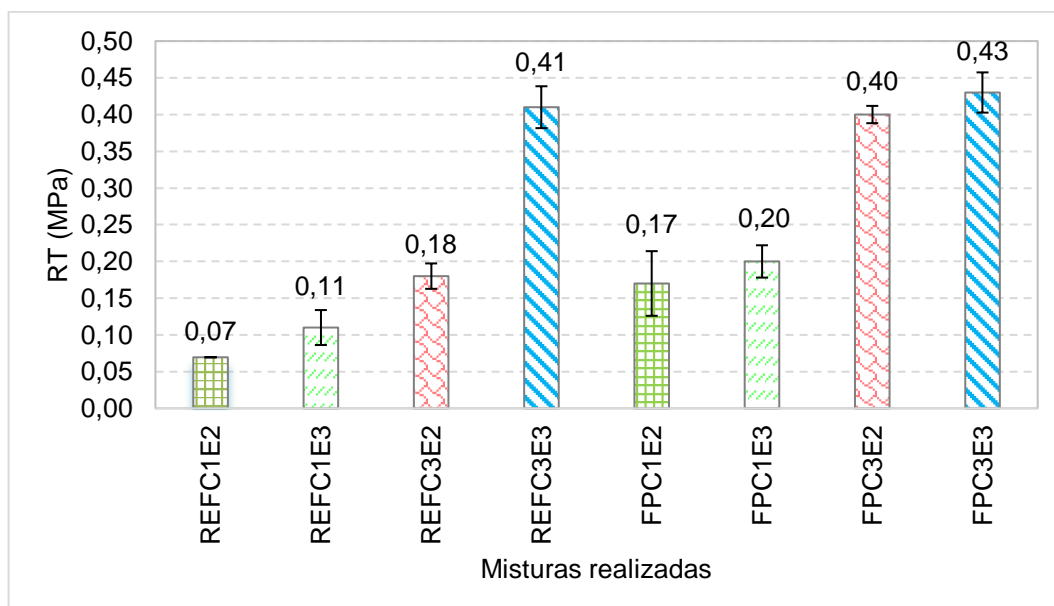
observam-se os resultados obtidos para RT para as oito misturas. Foram aplicadas barras de erros de desvio padrão para o eixo y.

Tabela 22 – Resultados de RT (MPa) médios

Mistura	RT médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
REF C1E2	0,070	0,0238	34,24
REF C1E3	0,115	0,0173	15,05
REF C3E2	0,184	0,0285	15,52
REF C3E3	0,411	0,044	10,69
FP C1E2	0,166	0,0220	13,25
FP C1E3	0,202	0,0118	5,84
FP C3E2	0,396	0,0274	6,92
FP C3E3	0,435	0,0414	9,53

Fonte: Autora.

Figura 33 – Resultados de RT (MPa) médios para as misturas propostas



Fonte: Autora.

Percebe-se, perante aos resultados, que as misturas com o material fresado obtiveram resultados de RT superiores em todos os casos, independente da porcentagem de cimento e emulsão asfáltica inseridos. Por exemplo, fixando as porcentagens dos agentes estabilizadores, considerando apenas o tipo da mistura (natural ou reciclada), o acréscimo de RT da mistura REF C1E2 para a mistura FP C1E2 foi de 143%. Da mistura REF C1E3 para a FP C1E3 o acréscimo foi de 81,81%;

da REF C3E2 para FP C3E2 foi de 122,22%; e, por fim, o aumento de RT da mistura REF C3E3 para a FP C3E3 foi de 4,65%. Sendo assim, o ganho mais significativo de RT entre as misturas REF e FP foi daquelas com 1% de cimento e 2% de emulsão, seguidas das misturas com 3% de cimento e 2% de emulsão.

De acordo com os resultados, o desvio padrão obtido para todas as amostras indicam o grau de variação de um conjunto de elementos. Portanto, pode-se afirmar que a variação do conjunto é pequena. Entretanto, o coeficiente de variação se apresenta como a variação dos dados obtidos em relação à média e esse coeficiente define a homogeneidade ou heterogeneidade de um conjunto de dados. A análise pelo teste-t contribui para identificar se as diferenças são ou não significativas em determinadas combinações (Tabela 23).

Tabela 23 – Test-t para os resultados de RT (MPa) médios para as misturas propostas

Hipótese de teste	H0 = 0 (iguais)	Alpha = 0,05	
<b>Grupos confrontados</b>	<b>Valor - t</b>	<b>Valor - P</b>	<b>Resultado</b>
REF C1E2 x FP C1E2	0,902503	0,000069	Rejeita H0
REF C1E3 x FP C1E3	0,478598	0,000041	Rejeita H0
REF C3E2 x FP C3E2	0,84145	0,000045	Rejeita H0
REF C3E3 x FP C3E3	0,951392	0,183148	Não rejeita H0
REF C1E2 x REF C1E3	0,63379	0,0117148	Rejeita H0
REF C3E2 x REF C3E3	0,65126	0,000060	Rejeita H0
FP C1E2 x FP C1E3	0,257836	0,0111271	Rejeita H0
FP C3E2 x FP C3E3	0,44312	0,1206403	Não rejeita H0
REF C1E2 X REF C3E2	0,642802	0,00036533	Rejeita H0
REF C1E3 X REF C3E3	0,153671	0,00000069	Rejeita H0
FP C1E2 x FP C3E2	0,679218	0,00000046	Rejeita H0
FP C1E3 X FP C3E3	0,032442	0,00011051	Rejeita H0

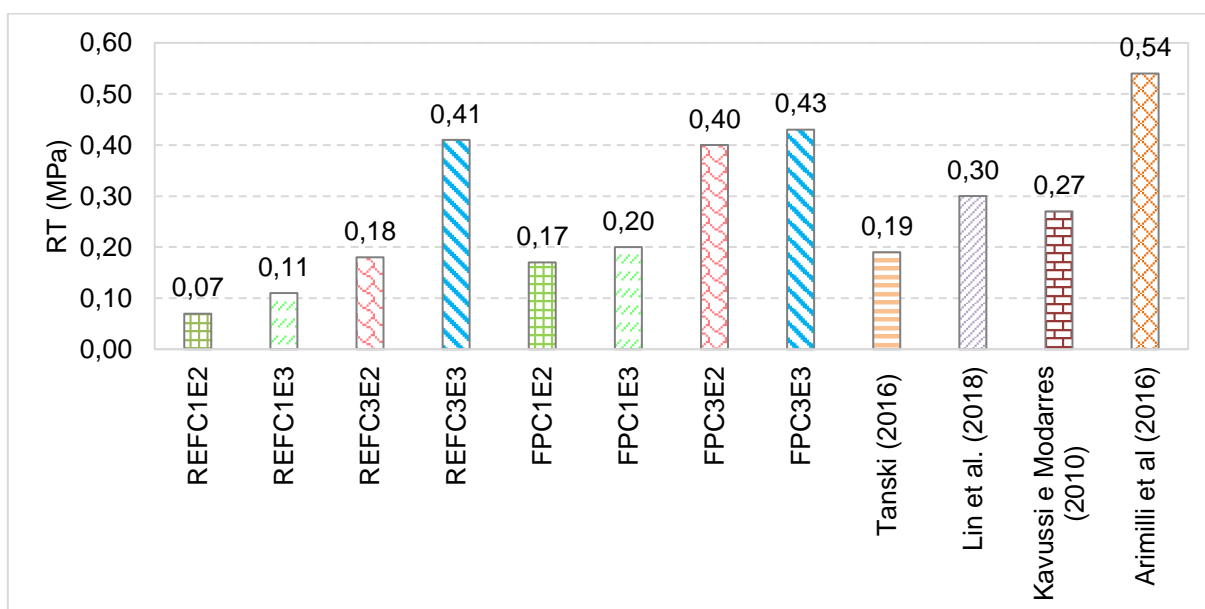
Fonte: Autora.

Com 95% de assertividade, de acordo com a análise estatística, não há diferenças entre as misturas REF C3E3 e FP C3E3. O resultado é inverso para as demais confrontações. Contudo, quando relacionamos apenas o teor de emulsão asfáltica com a RT e isolamos o fator da porcentagem de cimento, observa-se que, quanto maior o teor de emulsão inserida, maior é a RT. Todavia, para a comparação entre as misturas FP C3E2 e FP C3E3 não foram encontradas diferenças significativas entre os resultados.

Como se percebe, os gráficos demonstram certa variabilidade nos valores obtidos para as amostras em cada teor de emulsão utilizado. Esse comportamento é semelhante ao encontrado por Bessa *et al.* (2014) e comprova que, com a inserção de mais ligante há uma maior coesão dos agregados nas misturas, o que promove estabilidade ao esqueleto mineral. Os autores encontraram uma média de RT de 0,30 MPa nas amostras com 2% de emulsão asfáltica incorporados.

Lee, Kim e Han (2009) confeccionaram misturas recicladas a frio com teores variáveis de emulsão, através da compactação Marshall, e as amostras permaneceram com valores de RT entre 0,13 MPa e 0,20 MPa. A Figura 34 ilustra algumas comparações dos resultados obtidos em relação a outras pesquisas. Ressalta-se que os autores utilizados nas comparações têm processos diferentes de materiais e cura aos utilizados nesta Dissertação, conforme relatado na seção 2.4.

Figura 34 – Comparativo com outras pesquisas dos resultados de RT (MPa) das misturas propostas

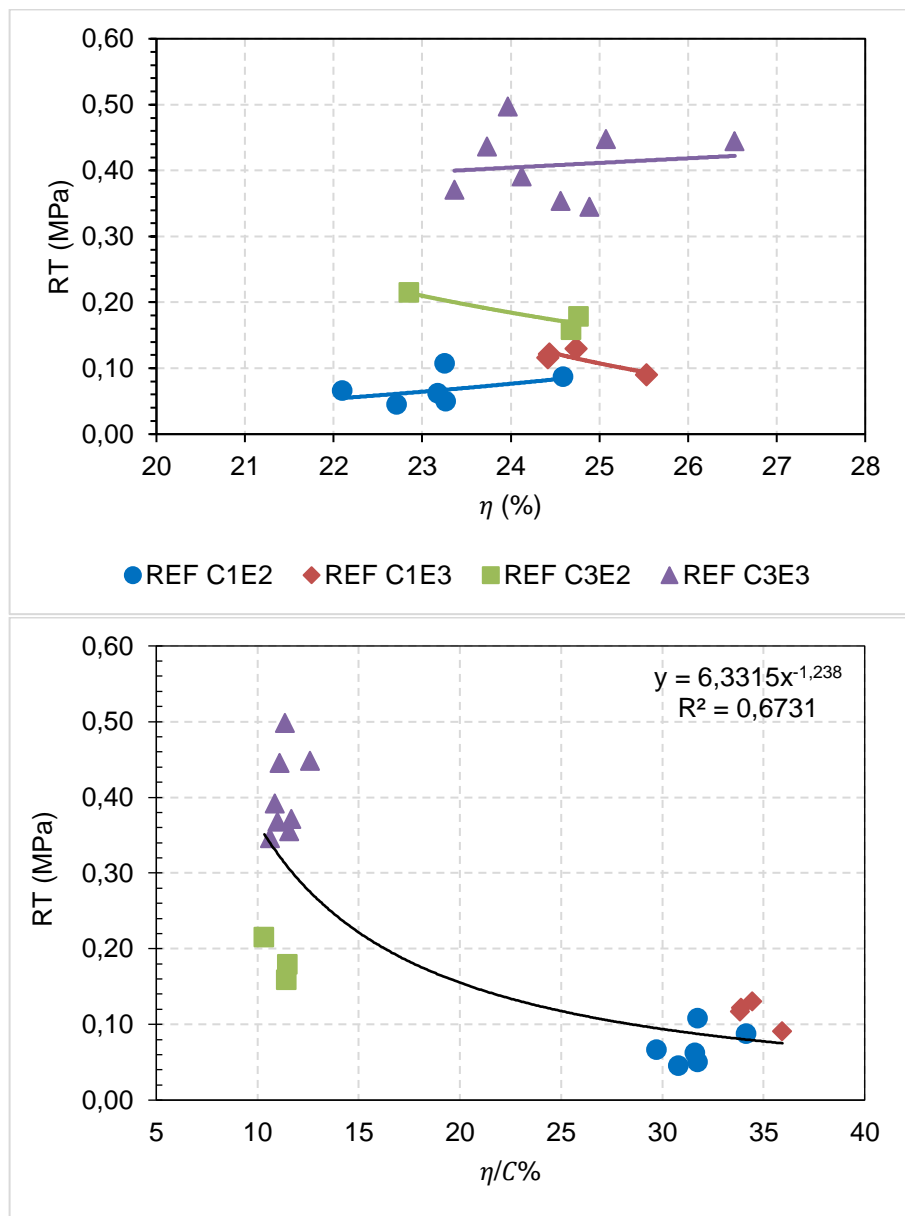


Fonte: Autora.

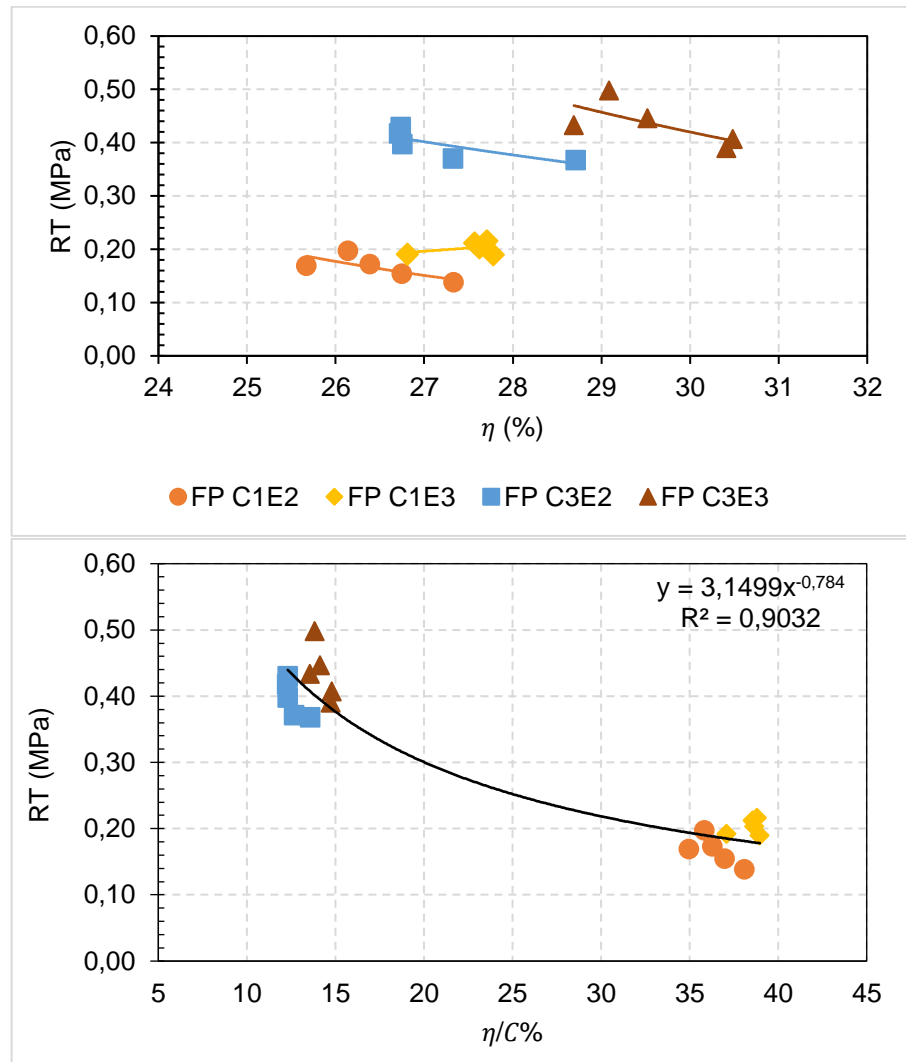
O DNIT (2013a) recomenda que, aos sete dias de cura, a RT esteja entre 0,25 e 0,35 MPa. A Wirtgen (2012) orienta a RT mínima de 0,225 MPa e Collings *et al.* (2020) um mínimo de 0,175 MPa para esse tipo de mistura. Como se pode observar, apenas as misturas FP C3E2, REF C3E3 e FP C3E3 atingiram a RT recomendada pelo DNIT, porém as amostras foram ensaiadas aos 28 dias de cura. Todas as misturas com 1% de cimento não atingiram o mínimo estabelecido pela bibliografia supracitada.

Nas análises anteriores, a comparação entre as misturas FP C3E2 e FP C3E3 não apresentou diferença significativa entre os resultados, enquanto que as demais comparações mostraram-se diferentes. Por isso, outra relação importante de análise, é verificar qual é a influência isolada da emulsão asfáltica no tocante ao resultado de RT e também do cimento em relação à RT. Apresenta-se nas Figuras 35 e 36, as representações gráficas da relação entre a RT em função da porosidade e do índice “ $\eta/C\%$ ” das misturas referência e recicladas.

Figura 35 – Variação da RT em relação à porosidade e  $\eta/C\%$  para as misturas de referência



Fonte: Autora.

Figura 36 – Variação da RT em relação à porosidade e  $\eta/C\%$  para as misturas recicladas

Fonte: Autora.

Identifica-se que, nas misturas de referência, a porosidade resultou na faixa de 22% à 27% em relação à RT, exibindo resultados de porosidade semelhantes, apesar de a mistura REF C3E3 apresentar a RT superior às demais. Nas misturas recicladas, os resultados seguiram um determinado comportamento, quanto maior foram as resistências das misturas, maior foi a porosidade. Portanto, as distinções de porosidade são facilmente identificáveis, visto que a presente pesquisa confeccionou as diferentes misturas apenas na umidade ótima e com a mesma energia de compactação.

É sabido da importância do parâmetro de porosidade em misturas cimentadas, não havendo tendências de ajustes para a porosidade (BALBO, 2006). O autor considera que, para a redução da porosidade na estrutura interna, esta pode ser

obtida de duas formas: aumentando a energia de compactação (redução da umidade ótima em relação a energias menores) para ganhar massa específica aparente seca ou, então, compactar o material no ramo seco.

Justifica-se a utilização dos parâmetros de porosidade e índice  $\eta/C\%$  com o estudo de Silva (2018), que objetivou investigar o desempenho mecânico de misturas BGTC e RAP com incorporação de cimento. Há certo modo de ajustar a porosidade, sendo apenas validado o parâmetro dentro da análise da porosidade nas diferentes amostras e misturas. O autor utilizou o índice  $\eta/C\%$ , pois os dados passam a exibir o ajuste estatístico satisfatório. O mesmo índice pode ser aplicado como indicador de desempenho para o auxílio na adoção de misturas detentoras de melhores desempenhos mecânicos.

Back (2022) utilizou misturas de BGTC, agregados naturais originários de mesma pedra e mesmo tipo de rocha – sendo classificada como um Riodacito de origem vulcânica – e, também, a inserção de cimento pozolânico (CP IV) no teor de 3,50%. A porosidade obtida em sua pesquisa esteve na faixa de 13 e 15%. Na relação porosidade/teor volumétrico de cimento, a autora obteve resultados entre 4,5% e 5,5% para a mesma mistura. Nas misturas desta Dissertação de mestrado, ao incorporar 3% de cimento às misturas de referência + a emulsão asfáltica, o valor da porosidade resultou na faixa dos 23% e o índice  $\eta/C\%$  ficou entre 10 e 13%.

Nas misturas de 70% fresado e 30% pó de pedra de Silva (2018) e com 4% de cimento, o autor obteve as porosidades de 20%, 23% e 27%, com baixo desvio padrão entre as amostras. O mesmo autor encontrou índices  $\eta/C\%$  de 7,5%, 9% e 11% para mesma mistura. Nesta pesquisa, ao incorporar 3% de cimento ao material fresado + a emulsão asfáltica, a porosidade ficou entre 26,5% e 30,5%, e o índice  $\eta/C\%$  ficou na faixa de 12% a 15%. É perceptível que a redução da porosidade afeta consideravelmente a resistência à compressão e à tração, assim como a diminuição no teor de cimento gera uma porosidade menor e um índice  $\eta/C\%$  superior na comparação.

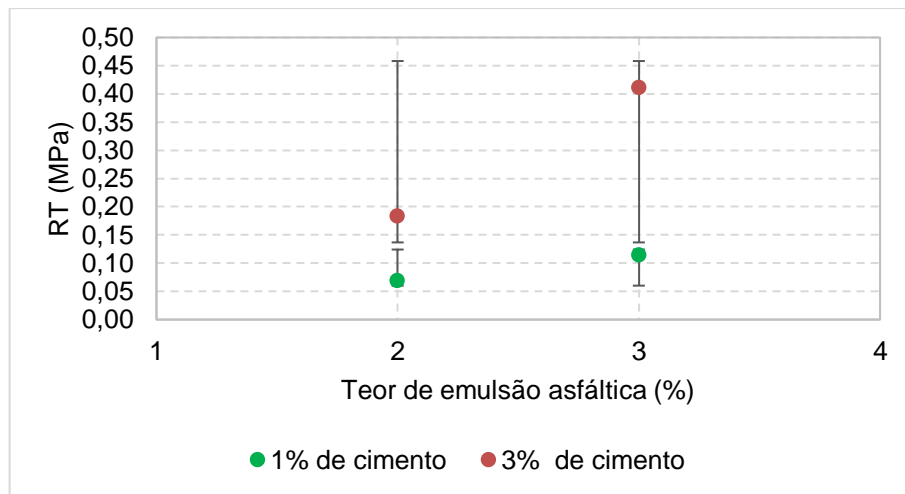
O índice “ $\eta/C\%$ ” se mostrou eficiente na análise de RT para ambos casos, sendo mais expressivos os resultados para as misturas recicladas, cujo resultado foi de  $R^2=0,9032$ , enquanto que, para as misturas de referência, o  $R^2$  foi de 0,6731. Destaca-se que, quanto maior é o teor de cimento – neste caso diferenciando 1% de 3% – menor é o índice de porosidade/teor volumétrico. Isso é válido para as misturas

de referência e também para as recicladas. O demonstrativo do volume de vazios se encontra no Apêndice.

#### 4.3.1 Efeito do teor de emulsão asfálticas nas misturas

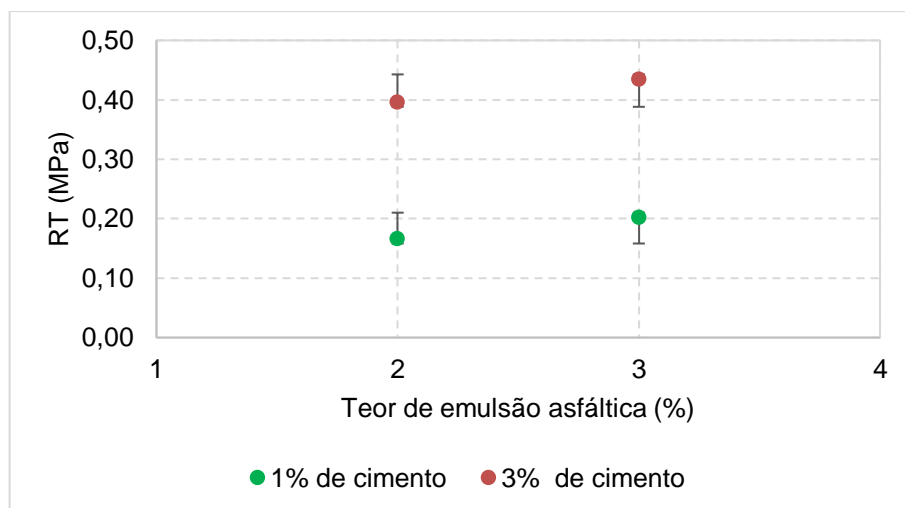
A relação do teor de emulsão asfáltica e RT é apresentada nas Figuras 37 e 38, em gráficos de dispersão, para as misturas REF e FP, nesta ordem. Foram aplicadas as barras de erros considerando o desvio padrão para o eixo y, correspondente aos resultados de RT de cada mistura analisada.

Figura 37 – Relação do teor de emulsão asfáltica (%) e RT (MPa) para as misturas REF



Fonte: Autora.

Figura 38 – Relação do teor de emulsão asfáltica (%) e RT (MPa) para as misturas FP



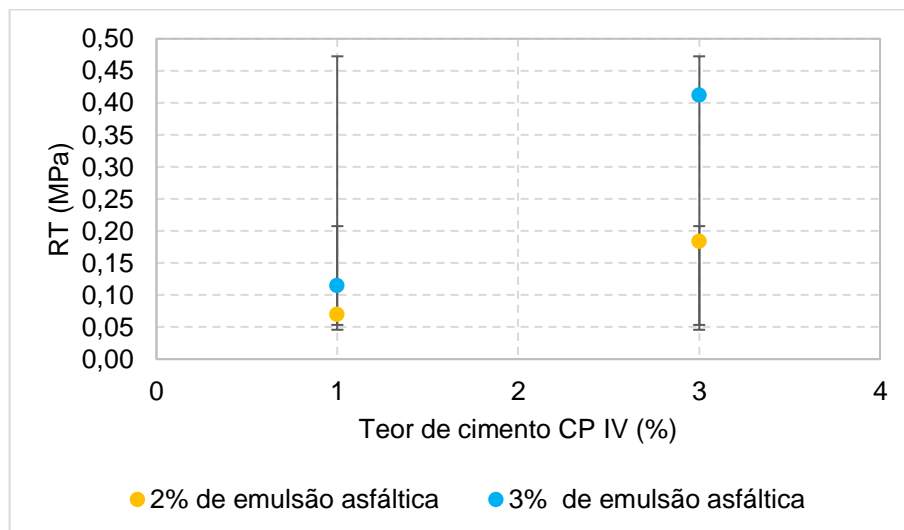
Fonte: Autora.

Isolando a variável cimento para as misturas de referência, o teor de emulsão asfáltica de 3% foi superior aos de 2% em ambos os casos. Porém, a maior diferença entre o acréscimo de um para o outro ocorreu para a mistura com 3% de cimento. As misturas de fresado e pó de pedra, resultaram em um comportamento de menor disparidade pois, isolando o cimento, ao aumentar o teor de emulsão asfáltica, os resultados se assemelham. Isso corrobora para a conclusão de que: ao aumentar o teor da emulsão asfáltica na mistura reciclada de 2% para 3%, mantendo o teor de cimento, tem-se um acréscimo de RT. Entretanto, as diferenças desse aumento não são significativas, conforme comprovado estatisticamente e, por isso, é possível economizar na emulsão asfáltica, obtendo resultados próximos àqueles com o maior teor de ligante.

#### 4.3.2 Efeito do teor de cimento Portland CP IV nas misturas

A relação do teor de cimento e RT é apresentada na Figura 39 por meio de um gráfico de dispersão, para as misturas REF. Foram aplicadas as barras de erros considerando o desvio padrão para o eixo y, correspondente aos resultados de RT de cada mistura analisada.

Figura 39 – Relação do teor cimento CP IV (%) e RT (MPa) para as misturas REF



Fonte: Autora.

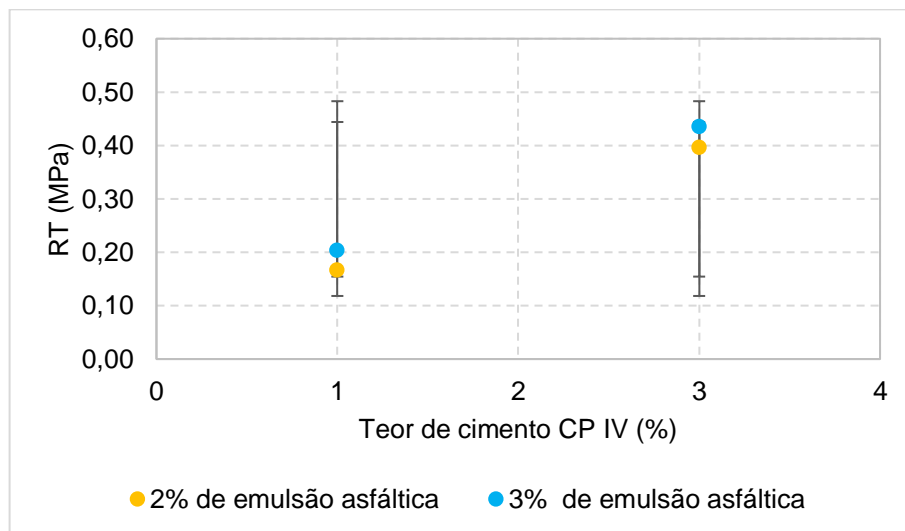


Isolando a emulsão asfáltica nas misturas REF, se pode notar que o teor de 3% de cimento foi superior ao de 1% em ambos os casos. Nesse caso, ao aumentar teor de cimento, a mistura com 3% de emulsão asfáltica cresceu consideravelmente se comparada à de 2% de emulsão. A análise estatística comprova que há diferenças significativas entre as médias e, portanto, nas misturas de 1% de cimento e aumentando a emulsão, o resultado passou de 0,07 MPa para 0,11 MPa, demonstrando um acréscimo de 57,14% entre eles. As misturas de 3% de cimento, ao elevar o teor de emulsão, passaram de 0,18 MPa para 0,41 MPa, o que demonstra um acréscimo de 127,78%.

Quando comparadas às misturas de 1% para 3% de cimento e mesmo teor de emulsão, os valores passam de 0,07 MPa para 0,18 MPa, crescendo 157,14%, assim como as demais passaram de 0,11 MPa para 0,41 MPa, crescendo 272,72%. Por essa razão, também se confirma a diferença significativa entre as misturas. Nas misturas com mais cimento e mais emulsão, pode-se justificar que houve certa diminuição nos vazios da mistura e o melhor intertravamento dos agregados, nesse caso ainda mais visível na mistura REF C3E3.

A relação do teor de cimento e RT é apresentada em um gráfico de dispersão na Figura 40 para as misturas FP. Foram aplicadas as barras de erros considerando o desvio padrão para o eixo y, correspondente aos resultados de RT de cada mistura analisada.

Figura 40 – Relação do teor de cimento CP IV (%) e RT (MPa) para as misturas FP



Fonte: Autora.

Ao isolar a emulsão asfáltica nas misturas FP, percebe-se que o teor de 3% de cimento foi superior ao de 1% em ambos os casos, seguindo o mesmo comportamento das misturas REF. A análise estatística evidencia que há diferenças significativas entre as médias, exceto nas misturas FP C3E2 e FP C3E3. Nas misturas de 1% de cimento com acréscimo de emulsão, o RT passou de 0,17 MPa para 0,20 MPa, demonstrando um acréscimo de 17,65% entre eles. As misturas de 3% de cimento, ao elevar o teor de emulsão, o RT passou de 0,40 MPa para 0,43 MPa o que demonstra um acréscimo de 7,50%. Ressalta-se que para as misturas de FP, há o fator do ligante envelhecido envolvido no agregado.

Quando comparadas as misturas de 1% para 3% de cimento e mesmo teor de emulsão, os valores de RT passam de 0,18 MPa para 0,40 MPa, crescendo 122,22%, assim como os demais passaram de 0,20 MPa para 0,43 MPa, acréscimo de 115%. Por essa razão, se confirma que as diferenças nos ganhos de resistência são menores em relação a REF, porém os resultados são mais homogêneos e o acréscimo de 7,5% da mistura FP C3E2 para a FP C3E3 justifica o fato de a diferença entre elas não ser tão significativa.

Esse comportamento em específico pode ser comprovado através do ensaio de compactação realizado, visto que essas duas misturas (FP C3E2 e FP C3E3) foram as que obtiveram as maiores massas específicas. Com isso, houve uma diminuição no índice de vazios da mistura e o melhor intertravamento dos agregados, nesse caso ainda mais visível pelo resultado da mistura FP C3E3. Taha *et al.* (2002) analisaram a influência de diversos teores de material fresado estabilizados com material pétreo virgem e cimento. Com isso, os autores observaram que, devido à diminuição do índice de vazios, as densidades aumentaram naquelas misturas com menor teor de fresado.

Com essas análises, é possível concluir que as misturas REF C3E3, FP C3E2 e FP C3E3 apresentaram as maiores resistências à tração aos 28 dias de cura, atingindo valores próximos à 0,40 MPa. Essa análise é de extrema importância para camadas cimentadas, visto que é uma propriedade mecânica que está diretamente relacionada aos efeitos de fadiga aos quais a camada cimentada estará submetida (SILVA *et al.*, 2017).

#### 4.4 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

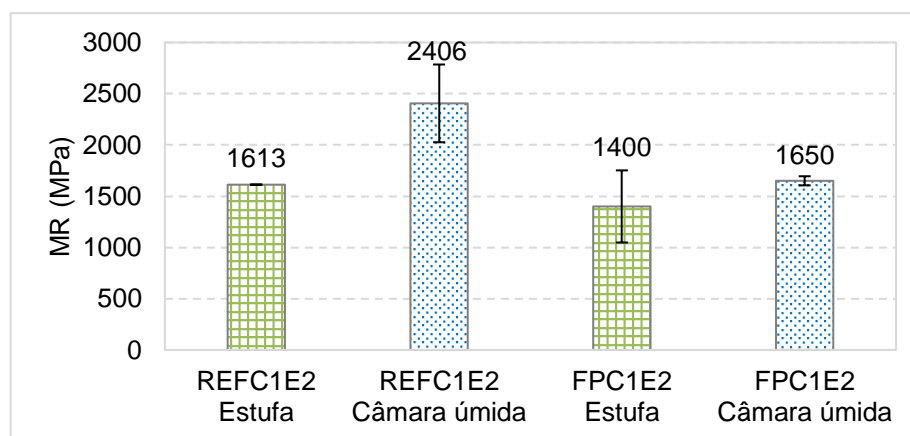
Seguindo o realizado na RT, foram comparados os dois tipos de cura (estufa e câmara úmida) nas misturas REF C1E2 e FP C1E2, para o ensaio de MR. Durante a execução desse ensaio, cada amostra ensaiada individualmente manteve-se dentro do coeficiente de variação  $\leq 10\%$ , garantindo a reprodutibilidade da mesma. A Tabela 24 demonstra, sucintamente, os resultados de MR médio (MPa) para cada mistura, com seus respectivos desvios padrão e coeficiente de variação (CV). Ainda, a Figura 41 ilustra em um gráfico a relação da forma de cura e MR médio (MPa). Foram aplicadas barras de erros de desvio padrão para o eixo y.

Tabela 24 – Resultados médios de MR (MPa) em relação ao processo de cura

Mistura	Cura	MR médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
REF C1E2	Estufa – 60°C	1613	379,44	23,53
REF C1E2	Câmara úmida	2406	351,89	14,63
FP C1E2	Estufa – 60°C	1400	44,56	3,18
FP C1E2	Câmara úmida	1650	184,16	11,16

Fonte: Autora.

Figura 41 – Relação da forma de cura e MR (MPa) para quatro misturas selecionadas



Fonte: Autora.

Evidencia-se que, para a cura em estufa da mistura REF C1E2, o MR se sobressaiu à mistura FP C1E2. O mesmo comportamento foi encontrado para as misturas curadas em câmara úmida. Ao analisar as misturas com mesmos teores de

agentes estabilizadores e levar em consideração apenas a forma de cura, são obtidos comportamentos idênticos, visto que a cura úmida proporcionou um aumento nos valores de MR. Nas misturas de referência, a cura em câmara úmida se sobressaiu 49,16% em relação à cura em estufa, enquanto que nas misturas de fresado e pó de pedra, as amostras com a cura úmida se sobressaíram cerca de 17,86%.

Isso confirma que as misturas de fresado possuem um resultado mais aproximado, com menor variabilidade. Sendo assim, a demonstração através da análise estatística por meio do teste-t mostra-se necessária para verificar se há diferenças significativas entre as misturas ou não, utilizando o nível de significância de 5%. A Tabela 25 apresenta os resultados da análise estatística para os resultados médios de RT em relação ao processo de cura utilizado.

Tabela 25 – Test-t para os resultados médios de MR (MPa) em relação ao processo de cura

Hipótese de teste	H0 = 0 (iguais)	Alpha = 0,05	
<b>Grupos confrontados</b>	<b>Valor - t</b>	<b>Valor - P</b>	<b>Resultado</b>
REF C1E2 x FP C1E2 (estufa)	0,0272	0,43449	Não rejeita H0
REF C1E2 x FP C1E2 (câmara úmida)	0,4300	0,03008	Rejeita H0
REF C1E2 (estufa) x REF C1E2 (câmara úmida)	0,9244	0,05680	Não rejeita H0
FP C1E2 (estufa) x FP C1E2 (câmara úmida)	0,1106	0,08429	Não rejeita H0

Fonte: Autora.

De acordo com a análise, se pode perceber que a única comparação em que houveram diferenças significativas foi entre as misturas REF C1E2 e FP C1E2, curadas de forma úmida. Sendo que nas demais, com 95% de assertividade, o comportamento é o oposto. Ressalta-se que, ao comparar todas as misturas, a REF C1E2 (úmida) apresentou o maior módulo de resiliência (2406 MPa). Para fins comparativos, nas misturas com fresado e curadas em estufa, Tanski (2016) identificou que, para misturas com 1% de cimento houveram decréscimos nos módulos de resiliência ao elevar o teor de emulsão de 2% para 3%.

Bessa *et al.* (2014) produziram as amostras na compactação Marshall e as curaram por 28 dias na temperatura ambiente e obtiveram variação dos resultados dentro de um mesmo teor de emulsão. No geral, valores mais elevados de MR são obtidos para as misturas com teor menor de emulsão (2%) e, para os outros dois teores (3% e 4%), não há uma diferença clara para essa propriedade. Os resultados médios de MR para variação no teor de emulsão encontrados pelos autores foram

1515 MPa (2%), 1397 MPa (3%) e 1383 MPa (4%). Na pesquisa dos autores não foi realizada análise estatística, porém, não há muita variabilidade entre os resultados. Ademais, a média indica a tendência de diminuição de MR conforme se aumenta o teor de emulsão.

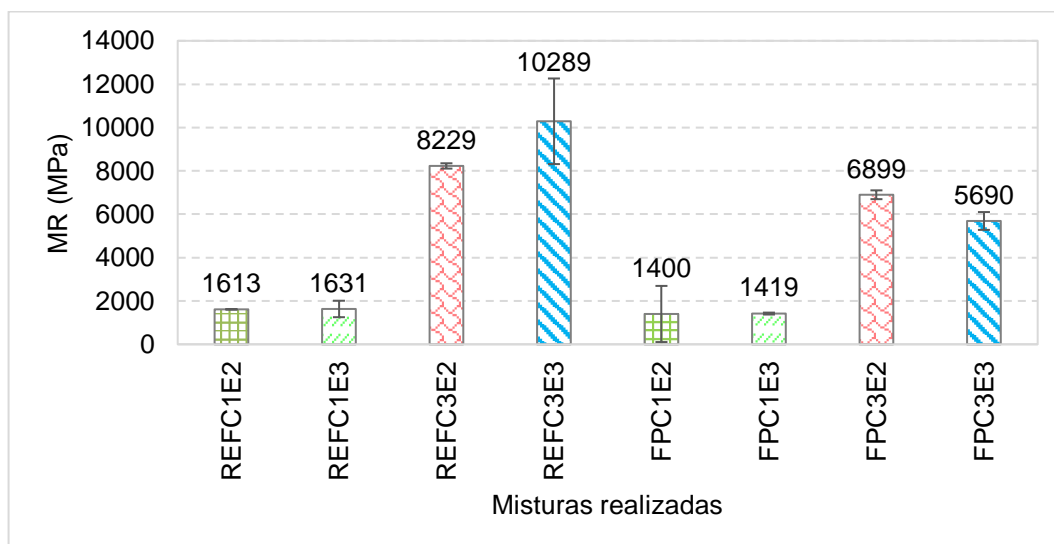
Para realizar o ensaio de MR seguiu-se o mesmo procedimento do ensaio de RT e utilizado a partir de então os resultados apenas com cura em estufa. A Tabela 26 exhibe o resultado de MR médio (MPa), desvio padrão (MPa) e coeficiente de variação (%) para cada mistura e a Figura 42 ilustra os resultados médios de MR para cada mistura. Foram aplicadas barras de erros de desvio padrão para o eixo y.

Tabela 26 – Resultados de MR (MPa) médios

Mistura	MR médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
REF C1E2	1613	379,44	23,53
REF C1E3	1631	122,44	7,51
REF C3E2	8229	1974,58	24,00
REF C3E3	10289	1294,36	12,58
FP C1E2	1400	44,56	3,18
FP C1E3	1419	202,98	14,30
FP C3E2	6899	410,57	5,95
FP C3E3	5690	280,29	5,11

Fonte: Autora.

Figura 42 – Resultados de MR (MPa) médios para as misturas propostas



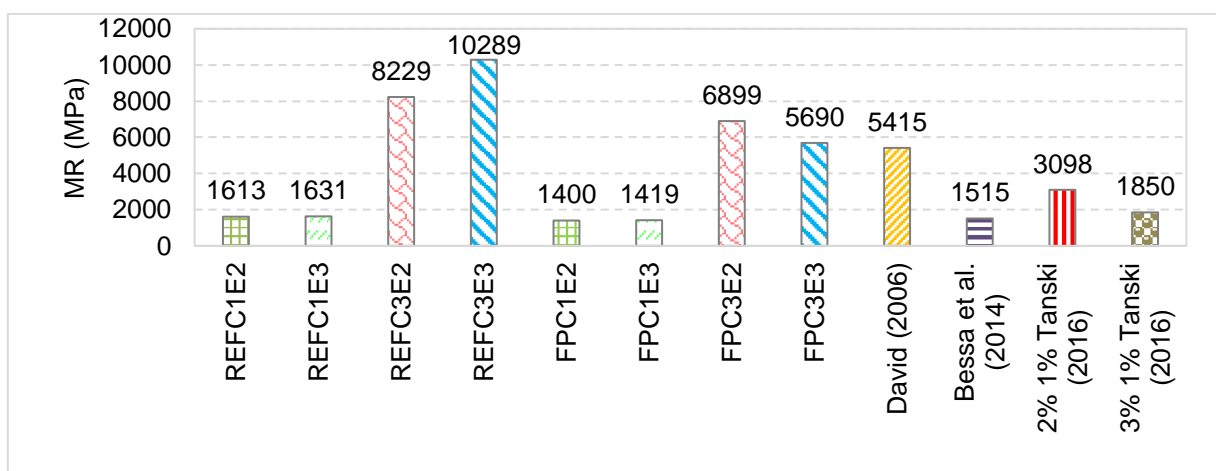
Fonte: Autora.

A partir dos resultados apresentados, nota-se que, diferentemente da RT, as misturas com o material fresado apresentaram resultados decrescentes em todos os casos em relação às de referência. Por exemplo, ao considerar apenas o tipo da mistura (natural ou reciclada), os decréscimos de MR da mistura REF C1E2 para a mistura FP C1E2 foram de, aproximadamente, 13,21%. Da mistura REF C1E3 para a FP C1E3, o decréscimo foi de, aproximadamente, 13%; da REF C3E2 para FP C3E2 foi de 16,16%; e, por fim a redução de MR da mistura REF C3E3 para a FP C3E3 foi de 44,69%.

Silva (2013) descreve que o módulo de resiliência está relacionado à rigidez da mistura asfáltica. Não se recomenda efetuar a análise do módulo de resiliência de forma direta, valores maiores ou menores podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento. O que deve ser considerado é a compatibilidade de rigidez entre as camadas do pavimento. Também deve haver relação entre os valores de rigidez e resistência dos materiais constituintes. Enfatiza-se que os valores de módulo de resiliência e de resistência à tração da mistura são fundamentais para o dimensionamento da estrutura do pavimento, quando se adotam métodos mecanísticos que têm como base o cálculo de tensões, deformações e deslocamento das camadas constituintes do pavimento.

A Figura 43 ilustra algumas comparações dos resultados de módulo de resiliência obtidos em relação a outras pesquisas. Ressalta-se que os autores utilizados nas comparações têm processos diferentes de materiais e cura ao desta Dissertação, conforme relatado na seção 2.4.

Figura 43 – Comparativo com outras pesquisas dos resultados de MR (MPa) das misturas propostas



Fonte: Autora.

Verifica-se, na Figura 43, que os maiores valores de MR estão representados pelas misturas de referência, o que indica uma maior rigidez das misturas com o uso do agregado natural, apesar da heterogeneidade encontrada nas amostras de mesmas misturas. Comportamento este que é indicativo de uma propagação de fissuras de forma mais rápida, indicando que módulos de menores valores são melhores para esse caso. Esse comportamento também foi observado por Silva (2018) e Rolim (2020), que compararam as misturas de agregados naturais com fresado, estabilizadas com cimento, porém sem emulsão asfáltica.

Contudo, David (2006), com uma mistura de fresado, pó de pedra e emulsão asfáltica (3%) encontrou resultado médio de MR de 5415 MPa. Sendo esse um resultado bem próximo ao obtido para a mistura FP C3E3. Bessa *et al.* (2014) obtiveram um valor de 1515 MPa na mistura com 2% de emulsão asfáltica. Os autores acreditam que os vazios da mistura têm influência mais significativa do que o teor de emulsão em si. Enfatiza-se a importância da compatibilidade de rigidez entre as camadas do pavimento, havendo assim a coerência entre os valores de rigidez e de resistência dos materiais constituintes das camadas.

Em pesquisa de Tanski (2016), com a utilização de 1% de cimento nas misturas apenas com material fresado e pó de pedra, o autor encontrou resultado de 3098 MPa para a mistura com 2% de emulsão e 1850 MPa para a mistura com 3% de emulsão, um decréscimo que representa aproximadamente 40,28%. O resultado de 1850 MPa está próximo ao que foi obtido para todas as misturas com 1% de cimento.

De acordo com os resultados, o coeficiente de variação retrata a variação dos dados em relação à média e define a homogeneidade ou heterogeneidade de um conjunto de dados. Estatisticamente, coeficientes de variação acima de 25% são considerados altos e ficam fora da homogeneidade do conjunto de amostras analisadas. Por isso, torna-se importante realizar a análise pelo teste-t, contribuindo para identificar se as diferenças são ou não significativas em determinadas combinações (Tabela 27).

Tabela 27 – Test-t para os resultados de MR (MPa) médios para as misturas propostas

(continua)

<b>Grupos confrontados</b>	<b>Valor - t</b>	<b>Valor - P</b>	<b>Resultado</b>
REF C1E2 x FP C1E2	0,0272	0,4345	Não rejeita H0
REF C1E3 x FP C1E3	0,5354	0,1963	Não rejeita H0

(continuação)

REF C3E2 x FP C3E2	0,0830	0,3173	Não rejeita H0
REF C3E3 x FP C3E3	0,0116	0,0009	Rejeita H0
REF C1E2 x REF C1E3	0,1891	0,9404	Não rejeita H0
REF C3E2 x REF C3E3	0,4274	0,0221	Rejeita H0
FP C1E2 x FP C1E3	0,092	0,8818	Não rejeita H0
FP C3E2 x FP C3E3	0,4642	0,0179	Rejeita H0
REF C1E2 X REF C3E2	0,0713	0,0047	Rejeita H0
REF C1E3 X REF C3E3	0,0178	0,0001	Rejeita H0
FP C1E2 x FP C3E2	0,0233	0,0017	Rejeita H0
FP C1E3 X FP C3E3	0,7449	0,00000063	Rejeita H0

Fonte: Autora.

Na interpretação do teste-t, ao comparar as misturas de referência com fresado, com mesmos teores de agentes estabilizadores, observa-se que há diferenças significativas entre as misturas REF C3E3 e FP C3E3. Isso representa o comportamento contrário da RT, onde a mesma comparação foi a única que não apresentou diferenças significativas nas médias da resistência à tração. Em relação às confrontações das misturas de mesmo agregado, mantendo o teor de cimento e variando a emulsão a REF C1E2 x REF C1E3, não se encontraram diferenças significativas entre as médias, assim como a comparação da FP C1E2 com a FP C1E3.

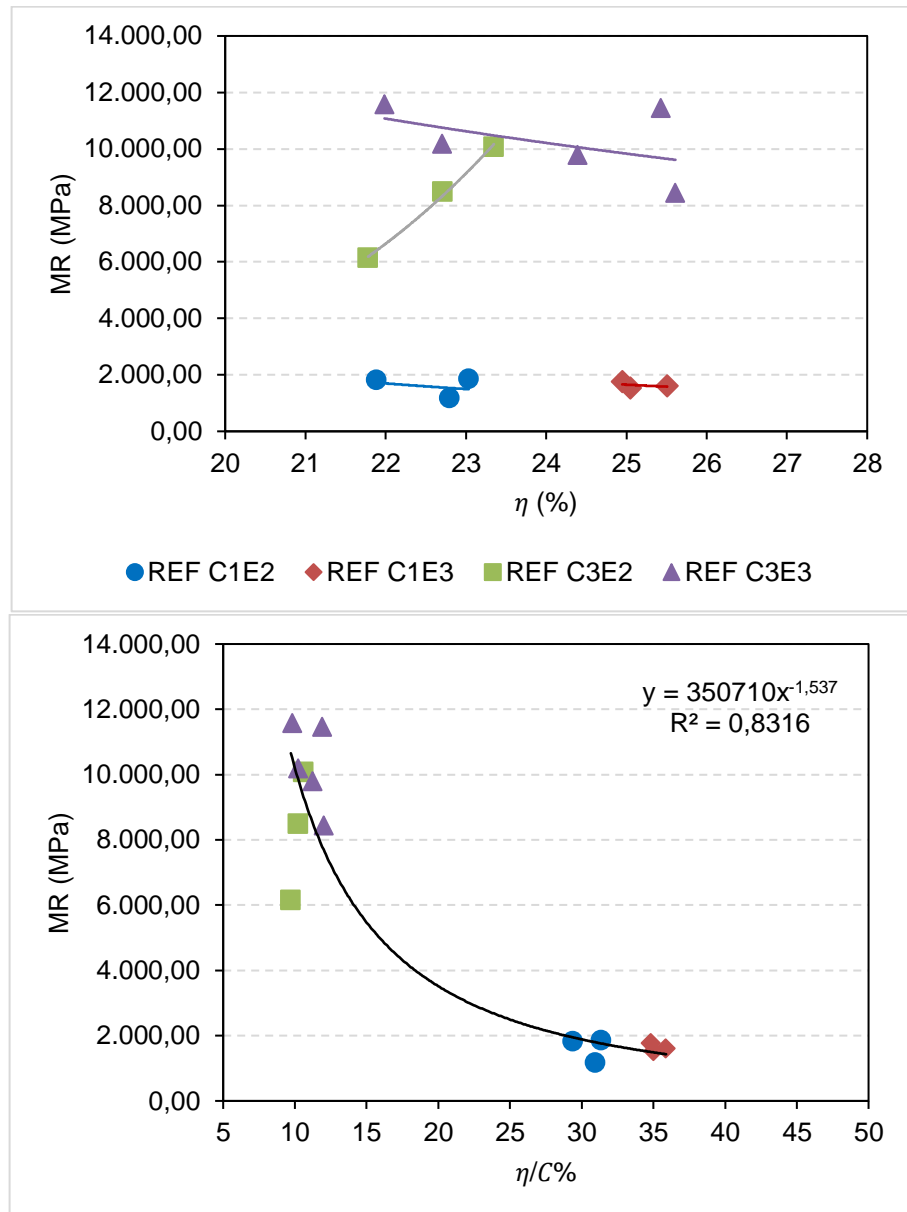
Isso demonstra que entre as mesmas misturas, com mesmo teor de cimento e mesmos agregados, se o teor de emulsão subir de 2% para 3%, isso não altera o resultado final dos módulos de resiliência. Em relação as confrontações REF C3E2 x REF C3E3 e FP C3E2 x FP C3E3, a diferença entre as médias dos resultados é significativa e pode ser justificada através do aumento no teor de cimento, já que os teores de emulsão asfáltica e os agregados pétreos se mantiveram os mesmos. É importante verificar qual é a influência isolada da emulsão asfáltica em relação ao resultado de MR e também do cimento em relação à MR.

Cardone *et al.* (2014) atribuíram a diminuição da rigidez às características dos cristais formados durante a hidratação do cimento, descrevendo que altas temperaturas de cura eliminam parte da água que seria utilizada no processo de hidratação do cimento com a formação de cristais menos uniformes que ocasionam o aumento da porosidade do cimento, prejudicando o potencial das propriedades



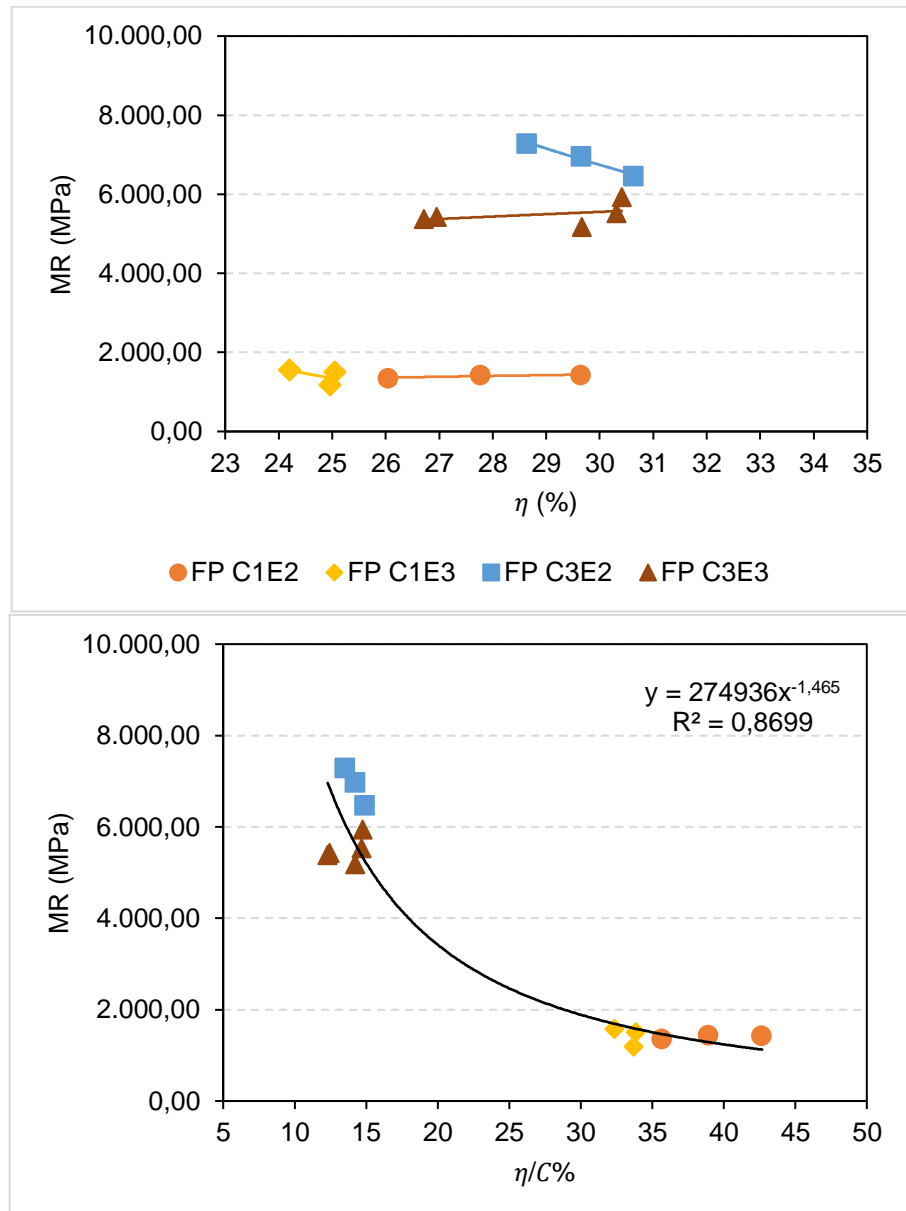
mecânicas da mistura, o que resulta em valores menores de rigidez. Outro elemento destacado pelos autores é o caso de a cura afetar somente as propriedades do ligante residual da emulsão, enquanto que a frequência do ensaio influencia o ligante residual e envelhecido. Apresenta-se nas Figuras 44 e 45 as representações gráficas da relação entre a MR em função da porosidade e do índice “ $\eta/C\%$ ” das misturas.

Figura 44 – Variação Do MR em relação à porosidade e  $\eta/C\%$  para as misturas de referência



Fonte: Autora.

Figura 45 – Variação do MR em relação à porosidade e  $\eta/C\%$  para as misturas recicladas



Fonte: Autora.

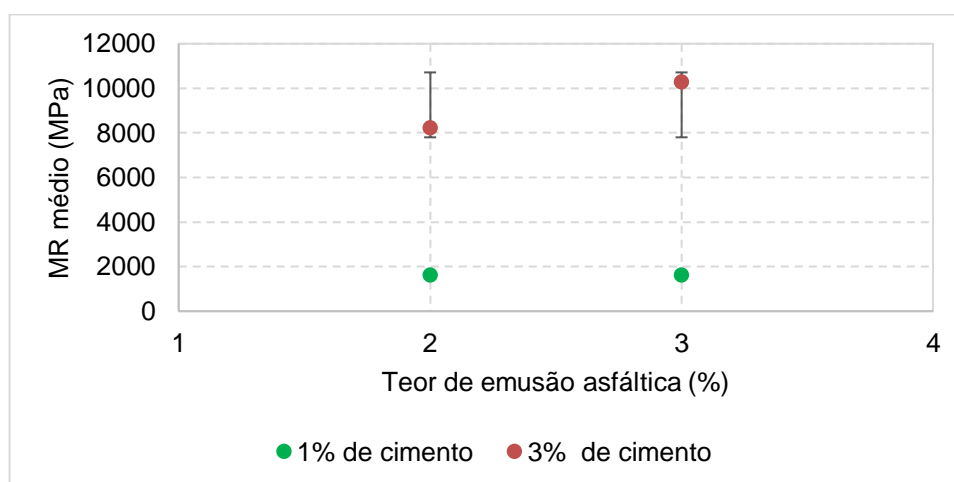
É possível identificar que nas misturas de referência a porosidade permaneceu na faixa de 22% à 26% em relação ao MR, exibindo resultados de porosidade semelhantes em todas as misturas. Nas misturas recicladas, os resultados de porosidade ficaram entre 24 e 31% em relação ao MR, sendo superiores. Conforme explanado anteriormente, opta-se por utilizar o índice  $\eta/C\%$ , uma vez que os dados passam a exibir o ajuste estatístico satisfatório. O mesmo índice pode ser aplicado como indicador de desempenho para o auxílio na adoção de misturas detentoras de melhores desempenhos mecânicos (SILVA, 2018).

O índice “ $\eta/C\%$ ” se mostrou eficiente na análise de MR para ambos casos, resultando em um  $R^2$  de 0,8316 nas misturas de referência e um  $R^2$  de 0,8699 nas misturas recicladas. Destaca-se ainda o mesmo comportamento citado na relação com a RT, de que, quanto maior é o teor de cimento, diferenciando 1% de 3%, menor é o índice de porosidade/teor volumétrico. E isso é válido tanto para as misturas de referência, quanto para as recicladas. De maneira similar à quantidade de cimento, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre o módulo da mistura, com um comportamento similar com as curvas dos módulos (PASCHE, 2016). O demonstrativo do volume de vazios se encontra no Apêndice.

#### 4.4.1 Efeito do teor de emulsão asfáltica nas misturas

A relação do teor de emulsão asfáltica e MR é apresentada em gráficos de dispersão pelas Figuras 46 e 47, para, respectivamente, as misturas REF e FP. Foram aplicadas as barras de erros considerando o desvio padrão para o eixo y, correspondente aos resultados de MR de cada mistura analisada.

Figura 46 – Relação do teor de emulsão asfáltica (%) e MR (MPa) para as misturas REF



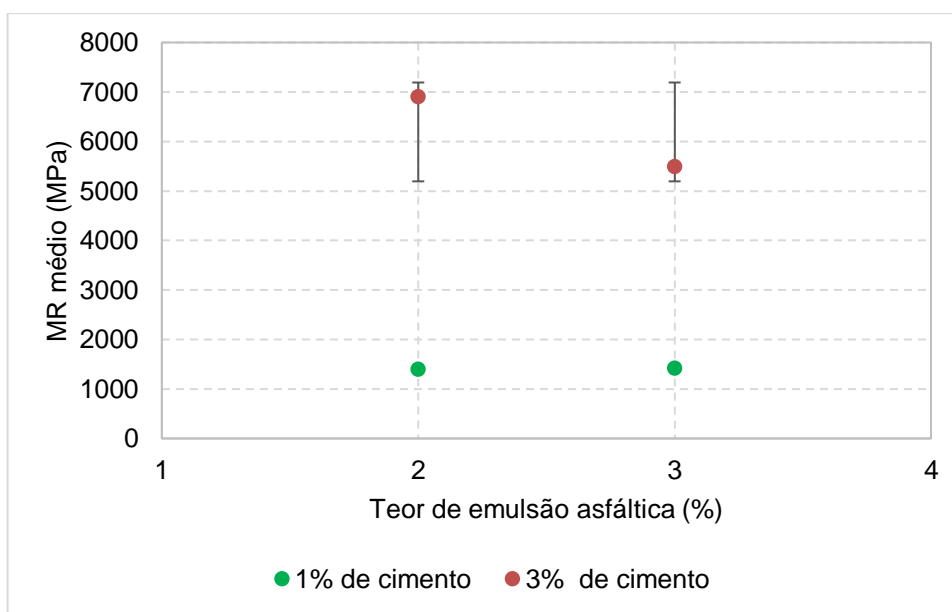
Fonte: Autora.

Mediante a análise percebe-se que, nas misturas de referência, o módulo de resiliência cresceu consideravelmente ao elevar o teor de cimento de 1% para 3%, o que revela um aumento de rigidez dessas misturas. O módulo de resiliência para 1% de cimento foi de 1613 MPa (2% emulsão) e 1631 MPa (3% emulsão), representando o acréscimo de, aproximadamente, 1,12%. Essa proximidade entre os resultados

reforça o encontrado na análise estatística, em que para as misturas REF C1E2 e REF C1E3 não há diferenças significativas entre as médias.

Para as misturas com 3% de cimento, a mistura com 2% de emulsão acresceu aproximadamente 20,03%, partindo de 8229 MPa para 10289 MPa. Destaca-se que na análise estatística foram encontradas diferenças significativas entre as médias das misturas REF C3E2 e REF C3E3. Em contrapartida, para o mesmo teor de emulsão asfáltica, analisando com o teor de cimento de 1% para 3% percebe-se que há acréscimo de aproximadamente 410,17% para misturas com 2% de emulsão e acréscimo de 530,84% nas misturas de 3%.

Figura 47 – Relação do teor de emulsão asfáltica (%) e MR (MPa) para as misturas FP



Fonte: Autora.

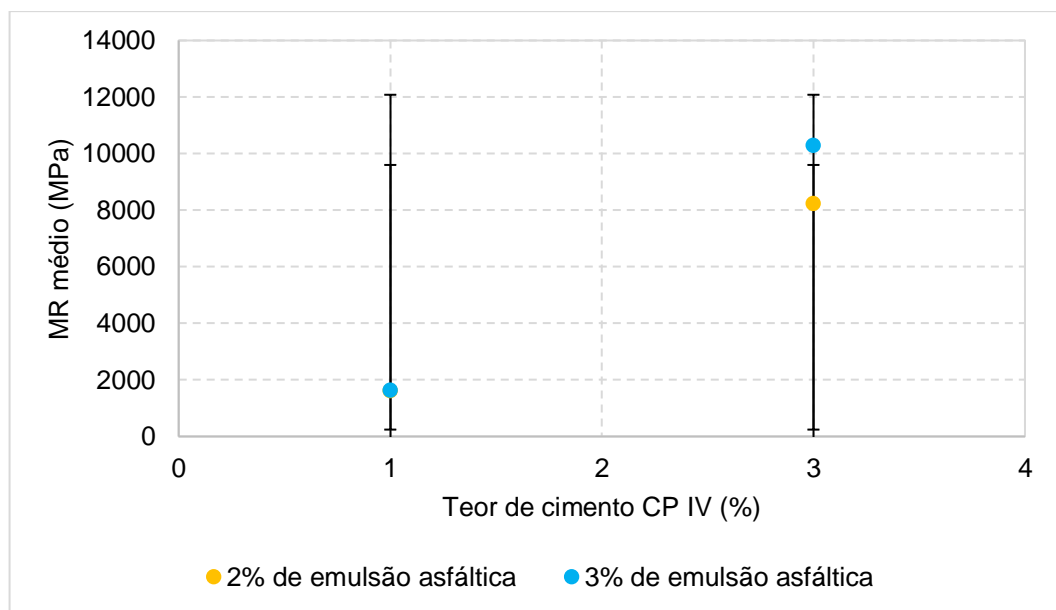
Com relação às misturas FP, ao modificar o teor de emulsão de 2% para 3% naquelas com 1% de cimento o MR passou de 1400 MPa para 1419 MPa, representando um acréscimo de aproximadamente 1,34%. Essa baixa porcentagem de acréscimo também reforça o encontrado na análise estatística, pois, para as misturas FP C1E2 e FP C1E3, não foram encontradas diferenças significativas entre as médias. Com relação às misturas com 3% de cimento, o MR passou de 6899 MPa (2% de emulsão) para 5487 MPa (3% de emulsão), o que representa um decréscimo de 20,47%. Com isso, para essas misturas de fresado, ao aumentar o teor de emulsão ocorreu um decréscimo do MR. Ademais, quando comparados os mesmos teores de

emulsão asfáltica para os diferentes teores de cimento, tem-se um acréscimo de 392,79% e 286,68%, sendo o maior acréscimo para a mistura de 2% de emulsão.

#### 4.4.2 Efeito do teor de cimento Portland CP IV nas misturas

A relação entre o teor de cimento e o MR é apresentada na Figura 48 por meio de gráficos de dispersão, para as misturas REF. Foram aplicadas as barras de erros considerando o desvio padrão para o eixo y, correspondente aos resultados de MR de cada mistura analisada.

Figura 48 – Relação do teor de cimento (%) e MR (MPa) para as misturas REF

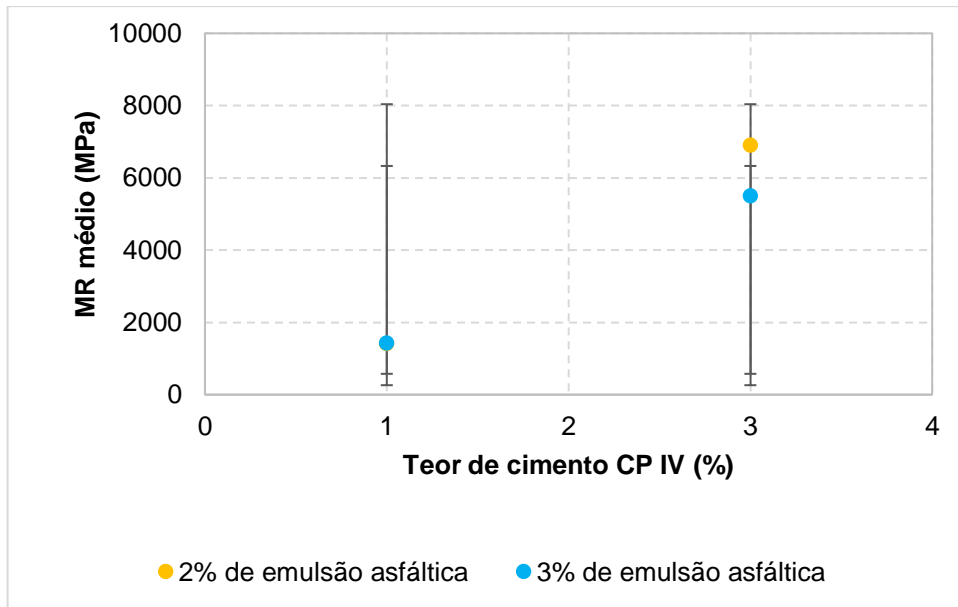


Fonte: Autora.

Nota-se na Figura 48, que os pontos de 1% de cimento estão muito aproximados, sendo 1613 MPa para 2% de emulsão e 1631 MPa para 3% de emulsão. O restante, com 3% de cimento, está um pouco mais distinto, pois apresenta 8229 MPa e 10289 MPa. Isolando a emulsão asfáltica nas misturas REF pode-se perceber que o teor de 3% de cimento foi superior ao de 1% em ambos os casos. Portanto, ao aumentar o teor de cimento, a mistura com 3% de emulsão asfáltica faz com que os resultados cresçam consideravelmente ao se comparar com a de 2% de emulsão. A análise estatística comprova que há diferenças significativas ao comparar as misturas de 1% de cimento com as de 3% de cimento, mesmo variando o teor da emulsão asfáltica.

A relação entre teor de cimento e o MR é exibida na Figura 49, em gráficos de dispersão para as misturas FP. Foram aplicadas as barras de erros considerando o desvio padrão para o eixo y, correspondente aos resultados de RT de cada mistura analisada.

Figura 49 – Relação do teor de cimento (%) e MR (MPa) para as misturas FP



Fonte: Autora

Verifica-se, na análise da Figura 49, que os pontos com 1% de cimento estão muito aproximados, sendo 1400 MPa para 2% de emulsão e 1419 MPa para 3% de emulsão. Os outros pontos com 3% de cimento estão um pouco mais afastados pois apresentam 6899 MPa e 5487 MPa. Isolando a emulsão asfáltica nas misturas REF, pode-se perceber que o teor de 3% de cimento foi superior ao de 1% em ambos os casos. Por isso, quando se aumentou o teor de cimento, a mistura com 3% de emulsão asfáltica cresceu consideravelmente, se comparada com a de 2% de emulsão.

Em contrapartida, houve um decréscimo no valor de módulo da mistura FP C3E3 em comparação com a FP C3E2. De acordo com Rolim (2020), há uma diminuição da rigidez devido à presença do ligante asfáltico que envolve os agregados do material fresado, fragilizando as ligações cimentantes das misturas com RAP. Nesse caso, o emprego da emulsão asfáltica também contribuiu na justificativa, pois o teor de emulsão aumentou. Ressalta-se, ainda, que os resultados mais rígidos foram obtidos ao se empregar os agregados naturais.

A partir dos resultados obtidos e das questões levantadas, para fins de conclusão, quando se tem uma composição com melhor intertravamento interno, pode-se obter melhores resultados de resistência e rigidez. É sabido que há certa variabilidade nos valores obtidos para as amostras em cada mistura, independente do teor de cimento ou emulsão, porém, apesar disso, a média indica certa tendência. No caso do MR, os valores tendem a diminuir conforme se aumenta o teor de emulsão, enquanto que na RT ocorre o oposto. Devido à maior coesão dos agregados na mistura, é possível que a RT aumente à medida que mais ligante for incorporado, promovendo a coesão nas misturas FP. E, no caso do MR, conforme discutido anteriormente, acredita-se que os vazios da mistura tenham um papel mais relevante do que a própria emulsão.

#### 4.5 ENSAIO DE FADIGA

A normativa DNIT – ME 434 (DNIT, 2021) indica que a vida de fadiga deve ser expressa em relação às tensões aplicadas, comparadas à resistência a tração estática (%RF), ou baseadas na deformação resiliente inicial ( $\epsilon_i$ ). Todavia, para materiais estabilizados quimicamente, é mais corriqueiro expressar a vida de fadiga em termos de tensões.

Sendo a análise composta por uma única mistura do presente estudo, optou-se por compará-la com as curvas obtidas por outros autores e que tivessem certa semelhança com a mistura estudada. É importante ressaltar que os autores utilizados na comparação não fazem a utilização dos mesmos materiais e mesmas misturas da presente pesquisa. Por exemplo, as misturas de Back (2022) são BGTC com 3,5% e 5,5% de cimento Portland CP – IV e os níveis de tensões utilizados nos ensaios para as amostras de 3,5% de cimento foram de 44% até 54%, enquanto que, para as misturas de 5,5% de teor de cimento, foi de 64% até 76% utilizando agregados naturais. Gaspar *et al.* (2016) empregaram brita 0, brita 1 e pó de pedra, todos de formação gnáissica e oriundos da cidade de Ervália, MG. O ligante utilizado foi a emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta do tipo RL-1C, composto por 61% de cimento asfáltico de petróleo (CAP) e 39% de fase aquosa.

Os valores de fadiga foram representados graficamente, relacionando o número de ciclos de aplicação de carga para ruptura e o percentual de relação entre

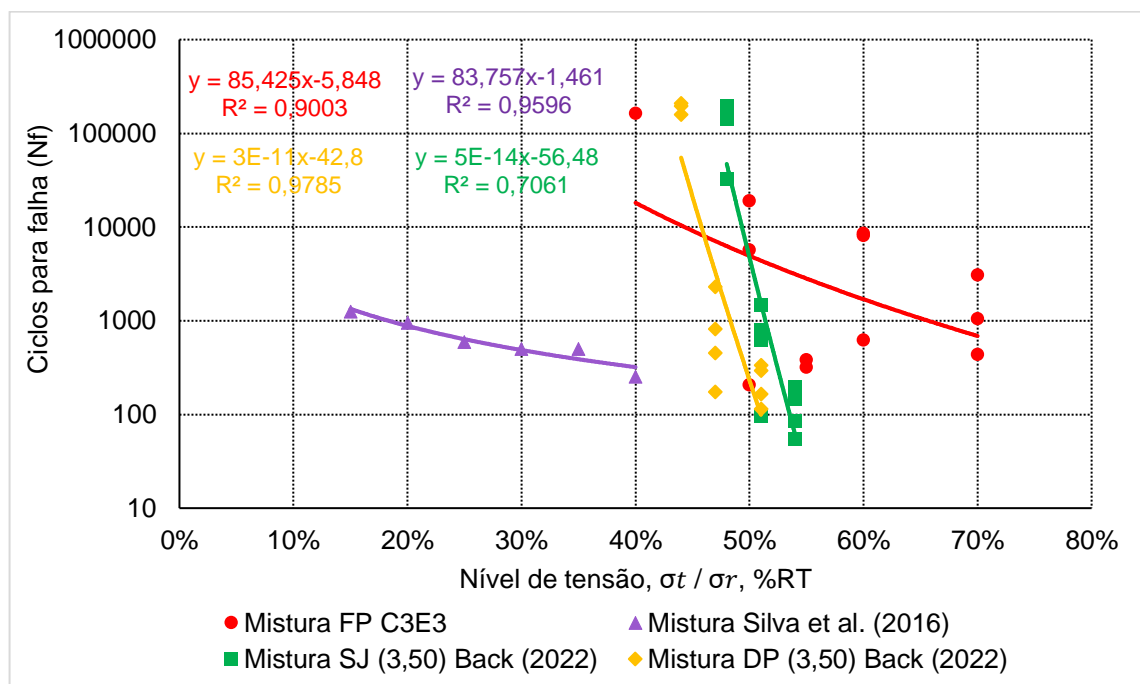
tensões, conforme a Figura 50 e em relação à Tensão de Tração conforme a Figura 51. A tabela 28 demonstra os resultados que foram encontrados no ensaio de fadiga.

Tabela 28 – Resultados do ensaio de fadiga

%RT	Tensão de tração (MPa)	Diferença entre Tensões (MPa)	Carga (N)	$\epsilon_r$	Nº Ciclos
70%	0,260	1,040	2845,78	0,000057	3076
60%	0,223	0,891	2440,28	0,000072	621
70%	0,260	1,040	2789,27	0,000095	436
70%	0,260	1,040	2927,20	0,000074	1046
50%	0,186	0,743	2030,36	0,000039	19166
60%	0,223	0,891	2492,67	0,000049	8111
40%	0,149	0,594	1660,54	0,000034	163707
60%	0,223	0,891	2469,36	0,000056	8516
55%	0,204	0,817	2323,07	0,000076	381
55%	0,204	0,817	2322,24	0,000270	321
50%	0,186	0,743	2111,47	0,000135	206
50%	0,186	0,743	2116,46	0,000050	5711

Fonte: Autora.

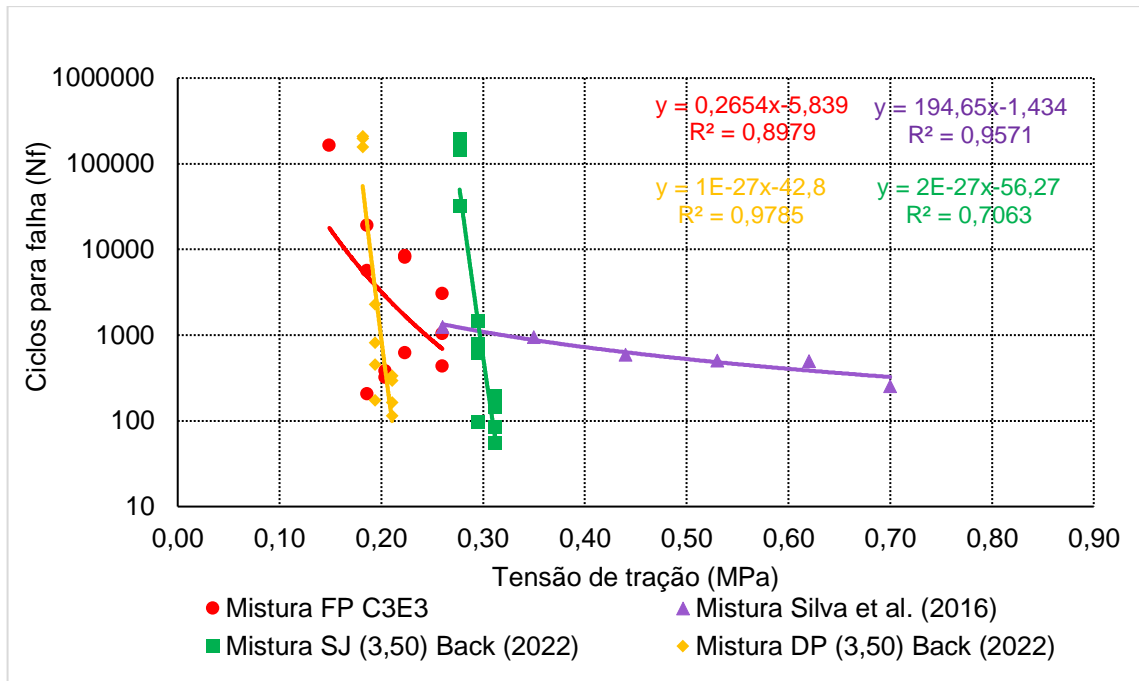
Figura 50 – Vida de fadiga em função da relação entre tensões



Fonte: Autora.



Figura 51 – Vida de fadiga em função da tensão de tração



Fonte: Autora.

Conforme observado nas Figuras 50 e 51, os resultados exibidos para a mistura ensaiada possuem baixa dispersão, apresentando  $R^2$  próximo de um. Esse resultado de baixa dispersão é um critério de controle das curvas e corrobora com o encontrado por diversos autores que estudaram a fadiga (GASPAR *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2016; SILVA; FARIAS, 2020; BACK, 2022).

A Austroads (2008) indica que 1.000.000 de ciclos é o valor alvo que uma mistura de BGTC deva atingir como valor efetivo de fadiga, contudo, essa mistura não atingiu esse patamar. Foi observado certo comportamento padrão, no qual, quanto menor o nível de tensão, maior o número de ciclos para a ruptura. O ensaio de fadiga para mistura com emulsão asfáltica foi realizado por Silva *et al.* (2016), sob condições de 25°C de temperatura. Observou-se que as diferenças de tensões aplicadas foram, na maioria das vezes, inferiores a 1.000 aplicações.

Conforme visualiza-se na curva referente à mistura FP C3E3 dessa pesquisa, pode-se perceber que, em algumas tensões aplicadas, o número de ciclos não chegou aos 1.000. Esse comportamento de degradação rápida representa uma baixa capacidade de suporte, de modo a suportar tensões máximas durante o ensaio de fadiga na ordem de 55%. Isso pode estar relacionado com a falta de envolvimento total dos agregados e também estruturação dos vazios, visto que o material fresado

também possui uma camada de ligante envelhecido, por esses fatores exibirem uma acelerada propagação das fissuras.

Apesar de Back (2022) não ter utilizado emulsão e material fresado, a autora também obteve baixa capacidade na tensão, na ordem de 55%, em conjunto com os menores teores de cimento inseridos (3,5%). O fator reinante no desempenho aquém de tais materiais, pertence à idade de cura de 28 dias em detrimento da utilização do cimento CP IV, mostrando que o processo de hidratação do cimento ainda se mostrou ativo aos 120 dias de cura, com ganhos de resistência muito maiores, na faixa de 94% entre 28 e 120 dias para as misturas com 5,5% de cimento (BACK, 2022). Contudo, as normativas vigentes, em específico a DNIT – ME 434 (DNIT, 2021), não sugere nenhuma idade de cura para realizar o ensaio, porém o *software* MeDiNa trabalha com idade de cura aos 28 dias para materiais estabilizados com cimento.

Gaspar *et al.* (2014) descrevem que a análise de energia dissipada no ensaio de resistência à tração é outro parâmetro de boa opção para auxiliar na ordenação de misturas asfálticas em relação à vida de fadiga a nível de dosagem, por ser um ensaio rápido. Porém, não se substitui a investigação da fadiga do material, por ser um ensaio realizado para diferentes níveis de carregamento e apresentar influência da rigidez dos materiais.

Ricci e Balbo (2009) reforçam a importância do ensaio de fadiga nas amostras. Com maior porosidade e com agregados frágeis na composição granulométrica das misturas, haverá um comportamento à fadiga menos adequado, não dependendo apenas das ligações na interface entre pasta/agregado, mas também da resistência do próprio agregado. Os autores também apontam a relevância estudos de campo que possam assimilar o desempenho à fissuração dos materiais estudados com diferentes relações de porosidade/teor volumétrico de cimento, assim como possíveis danos em termos de fissuração por reflexão para camadas de misturas asfálticas, além de avaliar a durabilidade de pavimentos diante os aspectos estruturais e funcionais que utilizam materiais reciclados.

A adição de agentes cimentantes é limitada ao máximo em 1% (Collings *et al.*, 2020) pois este material é um alto potencializador de preenchimento nas misturas, o que gera uma fragilidade, incentivando as fissuras associadas ao tráfego, ou seja, a fadiga se torna uma falha no mecanismo. De acordo com o mesmo guia, a presença de umidade para a compactação, bem como qualquer entrada de umidade além da

natureza parcialmente revestida do agregado, torna esse fator extremamente importante na avaliação do desempenho do material.

O mecanismo de ruptura por fadiga é caracterizado pela diminuição do parâmetro de rigidez do material cimentado, que se origina do acúmulo de danos em locais com pouca homogeneidade, e pela formação de fraturas progressivas na estrutura interna do material, principal manifestação da degradação do processo de fadiga está dobrando a resistência à tração. É necessário realizar o ensaio de fadiga com mais misturas, aprimorando os resultados encontrados. Além disso, é importante que sejam considerados tanto a RT como o MR para o ensaio de fadiga, pois ambos são importantes para encontrar os resultados, sendo a rigidez ainda mais importante do que a própria resistência.

## 5 CONCLUSÕES

O método de utilização de misturas asfálticas recicladas, estabilizadas com cimento e emulsão asfáltica ainda é pouco difundido mundialmente. Além da influência dos parâmetros da mistura como um todo, deve-se levar em consideração os fatores individualmente, como o tipo de emulsão e de cimento Portland, a dosagem, composição granulométrica, compactação e também as formas de cura. Sendo assim, com a metodologia empregada neste trabalho e, a partir dos resultados obtidos, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- a) Em relação às curvas de compactação e umidade, a literatura assinala que, para misturas com mesmo tipo de agregado e mesma granulometria, variando apenas o teor de cimento, o teor de umidade obtido deverá ser maior, enquanto a densidade será menor, à medida que haja um aumento no teor de cimento. Todavia, apenas o teor de umidade se enquadrou nesta perspectiva, enquanto as densidades obtiveram um comportamento contrário. Essa diferença nas densidades pode ser justificada pelo percentual de emulsão inserido nas misturas e também a alteração do equilíbrio da hidratação do cimento. Além disso, precisam ser consideradas a porosidade da rocha e a quantidade de material miúdo existente.
- b) Na RCS, os resultados da cura em estufa se sobressaíram em relação a cura úmida, melhorando o intertravamento dos agregados, bem como em relação aos agregados, aquelas com agregados naturais se sobressaíram. Na comparação entre todas as misturas, os resultados de RCS das misturas de referência tiveram um acréscimo de resistência conforme foram aumentando os teores de cimento e emulsão. O mesmo comportamento foi obtido nas misturas com fresado, exceto a mistura FP C3E3 que reduziu em relação à FP C3E2. De acordo com a análise estatística, percebe-se que, nas confrontações entre REF C1E3 e FP C1E3 e entre REF C3E2 e FP C3E2, não houveram diferenças significativas nos resultados, e, portanto, é possível economizar na utilização de agregados provindos da jazida, utilizando o material reciclado.
- c) Na RT houve divergência nos comportamentos das misturas em relação a forma de cura, porém a estufa proporciona ao fresado e à emulsão asfáltica uma interação maior para o entrosamento dos agregados com o ligante

envelhecido do RAP. Na análise de todas as misturas, de forma geral, aquelas com o material fresado tiveram resultados de RT superiores em todos os casos, independente da porcentagem de cimento e emulsão asfáltica inseridos. Com 95% de assertividade, de acordo com a análise estatística, não foram encontradas diferenças significativas nos resultados entre as misturas REF C3E3 e FP C3E3, obtendo o resultado inverso para as demais comparações.

- d) Em relação ao MR, diferentemente da RT, as misturas com o material fresado apresentaram resultados decrescentes em todos os casos, se comparados com as misturas de referência, independentemente do teor de cimento e emulsão. Porém, o aumento no teor de cimento de 1% para 3% elevou os resultados de MR para as misturas com mesma matriz pétreo. Entretanto, essa diminuição na rigidez pode estar relacionada com os cristais formados durante a hidratação do cimento pela cura em estufa, em temperatura mais elevada, e que eliminam a água utilizada no processo, aumentando a porosidade da mistura e diminuindo a rigidez. Outro fator a ser considerado, é o ligante já existente no material fresado, que pôde vir a modificar a estrutura da mistura. Apesar destes comportamentos, na análise estatística do ensaio de MR não foram encontradas diferenças significativas nos resultados das seguintes comparações: REF C1E2 x FP C1E2; REF C1E3 x FP C1E3; REF C3E2 x FP C3E2; REF C1E2 x REF C1E3; FP C1E2 x FP C1E3. Isso corrobora com o fato de que o fresado pode, ainda assim, representar um bom material com potencial de utilização.
- e) O ensaio de fadiga serviu como um parâmetro inicial para as misturas recicladas a frio estabilizadas com cimento e emulsão asfáltica, visto que foi ensaiada apenas uma mistura com 70% de fresado e 30% de pó de pedra com 3% de emulsão asfáltica e 3% de cimento Portland. Apesar da baixa dispersão nos resultados encontrados, pode-se concluir neste parâmetro que, quanto maior o número de ciclos para fratura completa, menor deverá ser o nível de tensão aplicado, porém o ensaio acaba se tornando um pouco mais lento. Sendo assim, destaca-se a importância de realizar esse ensaio em mais misturas para futuras comparações,

principalmente para ampliar os conhecimentos e base de dados frente a durabilidade dos materiais estudados.

- f) De forma geral, os resultados obtidos em todas as análises demonstraram que os agregados apresentam semelhança no comportamento. Em alguns aspectos, como na RT, por exemplo, o material fresado foi o detentor das maiores resistências, entretanto, o mesmo não ocorreu na RCS e MR. Percebeu-se que, com o mesmo ligante asfáltico presente no agregado do RAP, atrelando-se à emulsão asfáltica, água e cimento, o acréscimo na resistência e rigidez foi prejudicado e pareceu transformar a mistura em um material com propriedades viscoelásticas. Esse fato pode justificar a diferença do comportamento das misturas quando a rigidez é analisada.
- g) Isso posto, realizando um apanhado geral dos resultados, conclui-se que a reciclagem com a aplicabilidade do material fresado em combinação com o cimento Portland e emulsão asfáltica tem toda a capacidade de ser utilizada como agregado para a concepção de camada de base na pavimentação, desde que sejam respeitadas as características, limites e normativas vigentes que regem a correta utilização desse material. Com isso, se tem uma economia de agregados extraídos das jazidas, equilibrando com a estabilização do material para atender as necessidades de projeto, além da reutilização do RAP que poderia ser descartado inadequadamente.
- h) O índice  $\eta/C\%$  utilizado nas misturas exibe uma boa relação, e tornou-se um indicador capaz de auxiliar na definição dos melhores desempenhos mecânicos, conforme sugerido pela bibliografia. Contudo, embora este índice prevê o desempenho, ele demonstra limitação no que se refere ao MR, de forma a ser melhor aplicado em desempenhos vinculados às resistências.

## 6 SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

Aspirando a complementação e continuidade da presente pesquisa e ampliação da base de dados, sugerem-se os seguintes itens:

- a) Reproduzir um novo estudo melhorando as dosagens, fazendo com que se enquadrem na relação de quantidade de água e emulsão asfáltica a ser inserida nas misturas, bem como variar a forma de compactação, utilizando o compactador giratório (Superpave), por exemplo.
- b) Reproduzir a metodologia apresentada nessa pesquisa, com a substituição dos agentes estabilizadores pela cal ou espuma de asfalto;
- c) Avaliar de propriedades de resistência, rigidez e comportamento à fadiga de maiores quantidades de misturas recicladas e estabilizadas quimicamente, variando as porcentagens inseridas e o tipo de agente estabilizador;
- d) Analisar a associação significativa entre os ensaios laboratoriais e os parâmetros adotados nesta pesquisa (características, teor de cimento, idade de cura e tipo de rocha), utilizando o *software* MeDiNa para desenvolvimento de uma análise mecanicista em diferentes configurações de pavimentos.
- e) Reproduzir a metodologia apresentada para uma idade de cura de 91 dias, avaliando se haverá desenvolvimento dos parâmetros de resistência e rigidez, bem como a ação de uma maior cimentação no desempenho à fadiga dos materiais;
- f) Perfazer uma análise de custos aplicando o dimensionamento dos pavimentos a fim de verificar os potenciais financeiros de implementação das estruturas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Resolução N° 36**. Regulamento Técnico ANP N° 6/2012. Rio de Janeiro, RJ, 13 nov. 2012. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2012/novembro&item=ranp-36--2012>. Acesso em: 28 set. 2020.

AMERI, M.; SANJI, H.K.; TOOLABI, S.; HOSSEINI, S.H. Optimization of the cold in-place recycling mix design by nonlinear simplex method. **Transportation Research Journal**, v. 2, n. 1, 2012.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **PP 86-20<sup>1</sup>. Standard Practice for Emulsified Asphalt Content of Cold Recycled Mixture Designs**. Washington, D. C., 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D 244**. Standard Test Methods and Practices for Emulsified Asphalts. 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D 2397**. Standard Specification for Cationic Emulsified Asphalt. 2005.

ANTÃO, C.C.S.; KUCHIISHI, A.K.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L.L.B. Influência da velocidade de carregamento e temperatura no comportamento mecânico de misturas recicladas a frio com emulsão asfáltica e espuma de asfalto. **Revista Transportes**, v. 27, n. 3, p. 67-83, 2019.

ARANHA, A.L. **Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos**. 2013. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2013.

ARAÚJO, L.M.D.; FARIAS, M.M.; CARVALHO, J.C. Análise comparativa de alternativas de restauração de bases com incorporação de asfalto fresado. 2004. *In*: Reunião Anual de Pavimentação, 35., 2004, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2004.

ARIMILLI, S.; JAIN, P.K; NAGABHUSHANA, M.N. Optimization of Recycled Asphalt Pavement in Cold Emulsified Mixtures by Mechanistic Characterization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 2, 2016.

ARTERIS – CENTRO DE DESENVOLVIMENTO CONTROLADO. **ARTERIS T 269 – 14 – Porcentagem de vazios de misturas asfálticas densas e abertas compactadas**. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS – ABEDA. **Manual Básico de emulsões asfálticas**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.



ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION – ARRA. **Basic Asphalt Recycling Manual First Edition**. U. S. Department of Transportation. Washington, Estados Unidos, 2001.

ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION – ARRA. **CR101 – Recommended Construction Guidelines for Cold In-Place Recycling (CIR) Using Bituminous Recycling Agent**. Maryland, Estados Unidos, 2016.

ARRA. **FDR201A – Recommended Mix Design Guidelines For Full Depth Teclamatiom (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent**. Glen Ellyn, Estados Unidos, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, RJ, 2016b. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6293**: Ligantes asfálticos - Determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, RJ, 2015c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, RJ, 2016a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6567**: Ligantes asfálticos - Emulsões asfálticas - Determinação da carga de partícula. Rio de Janeiro, RJ, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6569**: Emulsões asfálticas catiônicas - Determinação da desemulsibilidade. Rio de Janeiro, RJ, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6570**: Ligantes asfálticos - Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas. Rio de Janeiro, RJ, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6576**: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro, RJ, 2007b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, RJ, 2013c. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11803**: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento – Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2013b. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12261**: Dosagem de brita graduada tratada com cimento - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 2013a. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12770**: Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, RJ, 1992. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14376**: Ligantes asfálticos - Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas - Métodos expeditos. Rio de Janeiro, RJ, 2019.4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14393**: Emulsões asfálticas — Determinação da peneiração. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14491**: Emulsões asfálticas - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro, RJ, 2007a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14855**: Ligantes asfálticos - Determinação da solubilidade em tricloroetileno. Rio de Janeiro, RJ, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14883**: Petróleo, derivados de petróleo e biocombustíveis – Amostragem manual. Rio de Janeiro, RJ, 2021. 37 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15619**: Misturas asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, RJ, 2016c. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, RJ, 2017. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16606**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, RJ, 2018b. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, RJ, 2018c. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2018a. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, RJ, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, 2009a.

AUSTROADS. **Cemented Materials Characterisation**: Final Report. 2014.

AUSTROADS. **Fatigue Performance of Cemented Materials under Accelerated Loading** – Influence of Vertical Loading on the Performance of Unbound and Cemented Materials. Technical Report. 2008.

AUSTROADS. **Guide to Pavement Technology Part 4D: Stabilised Materials**. Sydney, 2006.

AUSTROADS. **Mix design for stabilised pavement materials**. 2002. 43p.

AZEVEDO, B.S.; CASTELLI, F.; CASIRAGHI, Y.; GOLDONI, A.G.; ROSA, F.D. Análise da resistência à compressão simples de material fresado com adição de cimento Portland. *In*: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE, 28., 2017, Ijuí, RS. **Anais [...]**. Ijuí: Unijuí, 2017.

BACK, A.H. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas cimentadas do tipo bgtc utilizando duas rochas extrusivas representativas do estado do RS**. 2022. 271 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2022.

BAGHINI, M.S.; ISMAIL, A.; KARIM, M.R.B. Evaluation of cement-treated mixtures with slow setting bitumen emulsion as base course material for road pavements. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 323-336, 2015.

BAGHINI, M.S.; ISMAIL, A.B.; KARIM, M.R.B.; SHOKRI, F.; FIROOZI A.A. Effects on engineering properties of cement-treated road base with slow setting bitumen emulsion. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 18, n. 3, p. 202-215, 2017.

BALBO, J.T. Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura. **Revista Transporte**, v. 14, n. 1, p. 45-53, 2006.

BALBO, J.T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2007. 558 p.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2022.

BESSA, I.S.; ALMEIDA, L.R.; VASCONCELOS, K.L.; BERNUCCI, L.L.B. Design of cold recycled mixes with asphalt emulsion and Portland Cement. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 43, n.9, p. 773-782, 2016.

BESSA, I.S.; ARANHA, A.L.; VASCONCELOS, K.L.; BERNUCCI, L.L.B.; SILVA, A.H.M.; CHAVES, J.M. Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a frio. *In*: 21º Encontro de Asfalto. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP, 2014, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: IBP, 2014.

BOEIRA, F.D.; PINHEIRO, G.S.; SPECHT, L.P.; DRUZIAN, E.L.; JUST, M.L.; BABADOPULOS, L.F.A.L.; NASCIMENTO, L.A.H.; PEREIRA, D.S. Projeto e implementação de ensaio de fadiga por tração-compressão direta (uniaxial) para avaliação de dano em misturas asfálticas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, 2018.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. 3. ed. São Paulo: Exceção Editorial, 2011.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

BRITO, L.A.T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006.

BRONDANI, C. **Estudo do efeito deletério da água em misturas asfálticas a quente produzidas no Rio Grande do Sul**. 2019. 202 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

CARDONE, F.; GRILLI, A.; BOCCI, M.; GRAZIANI, A. Curing and temperature sensitivity of cement-bitumen treated materials. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 10, p. 868-880, 2014.

CERATTI, J.A.P.; BERNUCCI, L.B.; SOARES, J.B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015. 144 p.

CHANG, T.S.; WOODS, R.D. Effect Of Particle Contact Bond On Shear Modulus. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 118, n. 8, p.1216-1233, 1992.

CLOUGHT, G.W.; SIITAR, N.; BACHUS, R.C.; RAD N.S. Cemented Sand Under Static Loading. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, New York, v.n107, p. 799-817, 1981.

COLLINGS, D.C.; HEFER A.W.; JENKINS K.J.; JOHNS F.M. **Technical Guideline TG2: Bitumen Stabilised Materials – A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials**. 3. ed. Publicado por South Africa: Southern African Bitumen Association, Sabita. 2020. 221 p.

CONSOLI, N.C.; PASCHE, E.; SPECHT, L.P.; TANSKI, M. Key parameters controlling dynamic modulus of crushed reclaimed asphalt paving–powdered rock–Portland cement blends. **Journal of Road Materials and Pavement Design**, v. 19, p. 1716-1733, 2018.

CORREA, B.M. **Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de RAP**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.

CORRÊA, L.A.; BRAGA, M.S.; AGUIAR, M.F.P.; OLIVEIRA, F.H.L.; MONTEIRO, F.F., NETO, J.C.P. Melhoramento de solos para camadas de pavimentos rodoviários com material fresado e estabilização química. *In: Reunião anual de pavimentação, RAPv*, 43.; Encontro Nacional de conservação rodoviária, ENACOR, 17., 2014, Maceió, AL. **Anais [...]**. Maceió: Associação Brasileira de Pavimentação, 2014.

COSTA, C.; FILHO, W. O uso de reciclagem de pavimentos, como alternativa para o desenvolvimento sustentável em obras rodoviárias no Brasil. **Revista Traços**, Belém, v.12, n. 26, p. 39-58, 2010.

CROSS, S.A. Determination of Superpave gyratory compactor design compactive effort for cold in-place recycled mixtures. **Transportation Research Record**, Washington, v.1819, p. 152-160, 2003.

DA SILVA, V.D. **Avaliação da deformação permanente de misturas estabilizadas com asfalto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2019.

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

DAVIDSON, J.K.; BLAIS, C.; CROTEAU, J. A review of in-place cold recycling/reclamation in Canada. *In: Annual conference and exhibition of the transportation association of Canada - transportation innovation - accelerating the pace*, 2004. **Anais [...]**. Canadá: Transportation Association of Canada, 2004.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. 200p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2009.

DELLABIANCA, L.M.A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. 2004. 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DAER/RS. DAER/RS – Especificações Gerais Pavimentação - Base Tratada com Cimento. **DAER-ES 11/91**. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem, 1991.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DAER/RS. **EL 202/01**. Determinação da viscosidade Saybolt-Furol. 2001b.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DAER/RS. **EL 207/01**. Ensaio de peneiramento da emulsão. 2001c.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DAER/RS. **EL 210/01**. Determinação do resíduo por evaporação. 2001a.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ – DER/PR. **DER/PR ES-P 33/05**: Pavimentação – Reciclagem de pavimento in situ com adição de cimento. Curitiba, PR, 2005. 13p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 035**: Agregados – Determinação da abrasão Los Angeles – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998a. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 036**: Cimento Portland – recebimento e aceitação. Rio de Janeiro, 1995. 10 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 053**: Misturas betuminosas - percentagem de betume. Rio de Janeiro, RJ, 1994d. 10 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 054**: Equivalente de areia – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1997a. 10 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 083**: Agregados – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1998b. 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 086**: Agregado – Determinação do índice de forma – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994b. 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 089**: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994a. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 107**: Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994c. 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 180**: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – Determinação da resistência à compressão simples – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994e, 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 193**: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – Determinação da densidade. Rio de Janeiro, RJ, 1996, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 195**: Agregados – Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo. Rio de Janeiro, RJ, 1997, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT.  
**DNIT 135:** Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 2018c, 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT.  
**DNIT 136:** Pavimentação Asfáltica – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 2018a. 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT.  
**DNIT 141:** Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, RJ, 2010a. 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT.  
**DNIT 164:** Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 2013a. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT.  
**DNIT 165:** Emulsões asfálticas para pavimentação – Especificação de material. Rio de Janeiro, RJ, 2013c, 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT.  
**DNIT 167:** Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, RJ, 2013b, 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT.  
**DNIT 183:** Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 2018b, 15 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT.  
**DNIT 427:** Pavimentação – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT.  
**DNIT 434:** Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

DEVULAPALLI, L.; KOTHANDARAMAN, S.; SARANG, G. A review on the mechanisms involved in reclaimed asphalt pavement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 12, p. 185–196, 2019.

DINIZ, A.B.N.; MELO, R. Laboratory analysis of recycled aggregates and lime mixtures for using in pavement layers. *In*: **NOCMAT 2015** – Construction for Sustainability – Green Materials & Technologies, 2015, Canadá. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/310796392\\_LABORATORY\\_ANALYSIS\\_OF\\_RECYCLED\\_AGGREGATES\\_AND\\_LIME\\_MIXTURES\\_FOR\\_USING\\_IN\\_PAVEMENT\\_LAYERS](https://www.researchgate.net/publication/310796392_LABORATORY_ANALYSIS_OF_RECYCLED_AGGREGATES_AND_LIME_MIXTURES_FOR_USING_IN_PAVEMENT_LAYERS). Acesso em: 14 mai. 2020.

DU, S. Interaction mechanism of cement and asphalt emulsion in asphalt emulsion mixtures. **Materials and Structures**, v. 47, p. 1149–1159, 2014.

DU, S. Mechanical properties and shrinkage characteristics of cement stabilized macadam with asphalt emulsion. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 408-416, 2019.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, EAPA. 2017. **EAPA's position statement on the use of secondary materials, by-products and waste in asphalt mixtures**. European Asphalt Pavement Association: Brussel, Belgium, 2017.

FARIA, V.C.; KLINSKY, L.M.G. Parâmetros mecânicos da brita graduada tratada com cimento. *In: Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT*, Centro de Pesquisas Rodoviárias, CCR Nova Dutra. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/relatorios/relatorios-de-pesquisa-rdt/workshops-rdt/2016/nova-dutra/parametros-mecanicos-da-brita-graduada-tratada-com-cimento.pdf/view>. Acesso em: 24 ago. 2022.

FEDERAL HIGHWAY ASSOCIATION – FHWA. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice**. U. S. Department of Transportation. Publication, 2011. 60 p.

FEDRIGO, W. Efeito da energia de compactação e do teor de fresado no comportamento mecânico de misturas recicladas com cimento. *In: Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul*, GEORS, 8., 2015, São Leopoldo, RS. São Leopoldo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Núcleo Rio Grande do Sul, ABMS; Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2015.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS. 2005.

GASPAR, M.S.; VASCONCELOS, K.L.; BERNUCCI, L.L.B.; SILVA, A.H.M.; CHAVES, J.M. Comportamento mecânico de misturas tipo concreto asfáltico (CA) e mistura asfáltica antirreflexão de trincas (MAAT). *In: Encontro de Asfalto*, 21., 2014, Rio de Janeiro, RJ. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2014.

GIANI, M.I.; DOTELLI, G.; BRANDINI, N.; ZAMPORI, L. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 104, part A, p. 224-238, nov. 2015.

GODENZONI, C.; GRAZIANI, A.; PERRATON, D. Complex modulus characterisation of cold-recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt. **Road Materials and Pavement Design**, v. 18, p. 130-150, 2016.

GRAZIANI, A.; IAFELICE, C.; RASCHIA, S.; PERRATON, D.; CARTER, A. A procedure for characterizing the curing process of cold recycled bitumen emulsion mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 754- 762, 2018.



GUTHRIE, W.S.; SEBESTA, S.; SCULLION, T. **Selecting optimum cement contents for stabilizing aggregate base materials**. Texas Transportation Institute, Texas Department of Transportation, 2002. 64 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO - IBP. **Informações básicas sobre materiais asfálticos**. 6. ed. Rio de Janeiro: 1999. 76p.

ISOLA, M.; BETTI, G.; MARRADI, A.; TEBALDI, G. Evaluation of cement treated mixtures with high percentage of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 238-247, 2013.

JACINTHO, E.C. **Estudo de propriedades e comportamentos de misturas solo-emulsão aplicado a barragens**. 2010. 311 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

JITSANGIAM, P.; HUAN, Y.; SIRIPUN, K.; LEEK, C.; NIKRAZ, H. Effect of binder content and active filler selection on foamed bitumen mixtures: western Australian experience. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 5, n. 6, 2012.

JORGE, F.S. **Comportamento de material fresado com adição de cimento Portland e emulsão**. 2014. 100 p. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura e Meio Ambiente) – Universidade de Passo Fundo – UPF, Passo Fundo, RS, 2014.

KANDHAL, P.S.; MALLICK, R.B. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments**. Participant's Reference Book. Washington: Federal Highway Administration, 1997. 301 p.

KAVUSSI, A.; MODARRES, A. Laboratory fatigues models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1920-1927, 2010.

KERKHOF, E.V.D. Warm waste asphalt recycling in belgium - 30 years of experience and full confidence in the future. *In: Euraspalt and Eurobitume Congress*, 5., 2012, Istanbul. Istanbul: European Asphalt Pavement Association; Eurobitume, 2012, p. 13-15.

KLAMT, R.A.; FONTOURA, P.R.; BUDNY, J.; SANTOS, F.F. Estudo da utilização da reciclagem de concreto asfáltico como camada de pavimento. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – GeAS**, São Paulo, v. 7, n. 3, p. 539-553, set./dez. 2018.

KLEINERT, T., **Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de uma metodologia de dosagem**. 2016. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016.

KUCHIISHI, A. K.; ANDRADE, L. R.; BESSA, I. S.; ESTEVES, S. F.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. L. B. Influência da Granulometria nas

Propriedades Mecânicas de Misturas Recicladas a Frio Estabilizadas com Emulsão Asfáltica e Cimento Portland. *In: Congresso Ibero-Latino-americano del Asfalto*, 19.,2017, Medellin, Colombia. 2017.

KUZNIEWSKI, J; SKOTNICKI, L. Properties of mineral-cement emulsion mixtures. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, jun. 2020.

LARNACH, W.J. **Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strength of Soil-cement Mixtures**. Civil Engineering and Public Works Reviews. London, v. 55, n. 648, p. 903-905, 1960.

LEE, H.D.; KIM, Y.T.; HAN, B.T. **Laboratory performance evaluation of CIR-emulsion and its comparison against CIR-foam test results from phase III**. Iowa: Public Policy Center, University of Iowa, 2009. 93 p.

LEITE, L.F.M. **Estudos de preparos e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. 1999. 266 f. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LIN, J.; HONG, J.; XIAO, Y. Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 337-344, 2017.

LIN, J.; HUO, L.; XU, F.; XIAO, Y.; HONG, J. Development of microstructure and early-stage strength for 100% cold recycled asphalt mixture treated with emulsion and cement. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 924-933, 2018.

LIN, J.; WEI, T.; HONG, J.; ZHAO, Y.; LIU, J. Research on development mechanism of early-stage strength for cold recycled asphalt mixture using emulsion asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 137-142, 2015.

LOIOLA, P.R.R. **Estudo de agregados e ligantes alternativos para emprego em tratamentos superficiais de rodovias**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2009.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015. 638 p.

MENESES, J.P.C.; SAVASINI, K.V.; BERNUCCI, L.L.B. Efeito da distribuição de temperatura em base de pavimentos asfálticos composta de misturas recicladas a frio. *In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*, 34., 2020. 100% digital: ANPET, 2020.

MIDGLEY, L.; YEO, R. **The Development and Evaluation of Protocols for the Laboratory Characterisation of Cemented Materials**. Austroads Technical Report. Austroads Incorporated. 2008.

MILIUTENKO, S.; BJÖRKLUND, A.; CARLSSON, A. Opportunities for environmentally improved asphalt recycling: the example of Sweden. **Journal of Cleaner Production**, v. 43, p. 156-165, 2013.

MOGHADAM, B.B.; MOLLASHAHI, H.F. Suggesting a simple design method for cold recycled asphalt mixes with asphalt emulsion. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 23, n. 7, p. 966-976, 2017.

MOLZ, C.; CERVO, T.C. Uso do material fresado estabilizado granulometricamente em camadas granulares na pavimentação. *In: Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul – GEORS, 10., 2019, Santa Maria. Anais [...].* Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2019. Disponível em: <http://docs.geors2019.com.br/?dir=pavimentos>. Acesso em: 21 abr. 2020.

MOREIRA, J.P.; PEREIRA, P. Reutilização de material fresado em camadas estruturais de Pavimentos – Novas perspectivas. *In: Jornadas Luso-Brasileiras de pavimentos, 6., 2007, Porto. Actas das VI Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos.* Lisboa: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007, p. 15-35.

MULLAPUDI, R.S.; KARANAM, G.D.; KUSAM, S.R. Influence of chemical characteristics of RAP binders on the mechanical properties of binders and mixes. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 12, p. 632-637, 2019.

NASCIMENTO, R.S. **Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2017.

OLIVEIRA, P.C.A. **Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem profunda na recuperação de pavimentos flexíveis.** 2003. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2003.

PAIVA, C.E.L.; OLIVEIRA, P.C.A. A importância do controle de compactação no desempenho da camada reciclada com cimento Portland. *In: CONINFRA 2010 – Congresso de Infraestrutura de Transportes, 4., 2010, São Paulo. Anais [...].* São Paulo: Associação Nacional dos Transportes Ferroviários, 2010. 16 p.

PAIVA, C.E.L.; OLIVEIRA, P.C.A. Impacto da atividade do CAP e do percentual de asfalto fresado na resistência à fadiga de uma base reciclada com cimento. *In: Encontro de asfalto, 21., 2014, Rio de Janeiro. Anais [...].* Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2014.

PASCHE, E. **Estudo da rigidez e resistência de uma mistura de material fresado asfáltico e pó-de-pedra com a adição de cimento.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016.

PIRES, G.M. **Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

PIRES, G.M.; RENZ, E.M.; SPECHT, L.P. Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz moída para aplicação em camadas de pavimento. *In*: Reunião Anual de Pavimentação, RAPv, 43.; Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, ENACOR, 17., 2014, Maceió, AL. **Anais [...]**. Maceió: Associação Brasileira de Pavimentação, 2014.

PIRES, G.M.; SPECHT, L.P.; PINHEIRO, R.J.B.; PEREIRA, D.S.; RENZ, E.M.; Comportamento mecânico de material fresado após processo de estabilização granulométrica e química por meio da incorporação de cimento e cinza de casca de arroz moída. **Revista Matéria**, v. 21, n. 3, p. 365-384, 2016.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION – PCA. **Guide to Full Depth Reclamation (FDR) with Cement**. Illinois, EUA., 2005.

POSSEBON, E.P. **Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes Cimentos Asfálticos de Petróleo produzidos no Brasil**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

PUGLIESI, N. Cimento: Diferentes tipos e aplicações. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP**, São Paulo, SP, 21 fev. 2018. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>. Acesso em 24 ago. 2022.

QUEIROZ, F.A. **Utilização de material fresado para aplicação em camadas estabilizadas de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande, PB, 2011.

REZENDE, J.P.; OLIVEIRA, T.M.; FERNANDES, M.A.; CAMPOS, B.H.; ROCHA, S.A.; SOUSA, D.H.S. Dosagem de pré-misturado a frio com inserção de escória de aciaria como agregado. **Revista CIATEC – UPF**, v. 10, n. 2, p. 65-76, 2018.

RICCI, G.; BALBO, J.T. Resistência e elasticidade de concretos compactados com agregados reciclados de construção e demolição para aplicações em pavimentações. **Transportes**, v. 17, n. 2, p. 27-35, 2009.

ROLIM, A.C. **Avaliação de parâmetros de resistência mecânica de material fresado estabilizado com cimento Portland, cal e rocha basáltica pulverizada para emprego em pavimentação**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.

ROSA, F.D.; JORGE, F.S.; BRITO, L.A.T.; CERATTI, J.A.P. Análise do comportamento mecânico de um pavimento reciclado com adição de diferentes agentes estabilizadores. **Revista Transportes**, v. 23, n. 2, p. 95-104, 2015.

SACHET, T. **Estudo de propriedades mecânicas de concretos compactados com incorporação de fresados para bases de pavimentos**. 2012. 186 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SAGRILO, A.V. **Estudo de Deformabilidade e Empacotamento de Britas com Diferentes Origens Litológicas do Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.

SILVA, C.A.R.; MIRANDA JÚNIOR, J. Reciclagem de camadas betuminosas com sub-base estabilizada com cimento na BR-381: Uma experiência. *In: Reunião Anual de Pavimentação*, 32., 2000, Brasília, DF. Brasília: ABPv, 2000.

SILVA, E.S. **Utilização de resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos em bases estabilizadas granulometricamente e em revestimentos asfálticos na cidade de Manaus**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, 2013.

SILVA, J.P.; FARIAS, M.M. Estudos laboratoriais para determinação do comportamento da vida de fadiga de misturas asfálticas rejuvenescidas. **Revista Transportes**, v. 28, n.1, p. 111-121, 2020.

SILVA, M.R. **Determinação de parâmetros que influenciam nas propriedades mecânicas de material fresado estabilizado granulométrica e quimicamente para emprego em pavimentação**. 2018. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

SILVA, M.R.; CERVO, T.C.; BARONI, M.; DUARTE, F. Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado para emprego em camadas de pavimentos. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 5, n. 1, p. 20-31, 2017.

SILVA, T.K.; CARVALHO, C.A.B.; MARQUES, G.L.O.; SANT'ANNA, G.L.; SILVA, T.O.; MACHADO, C.C. Dosagem de mistura betuminosa a frio e seu estudo sob efeitos de cargas estáticas e repetidas. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 97-106, Viçosa, MG, 2016.

SPECHT, L.P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. 279p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Univerisdade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2004.

SPECHT, L.P.; PIRES, G.M.; VITORELO, T.; HIRSH, F.; CRONST, F.; BERGMANN, E.C.; TIFENSEE, M.D. Utilização de material fresado como camada de pavimento:

estudo laboratorial e aplicação de campo. *In*: 42º Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), 2013, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv); Associação Brasileira dos Departamentos Estaduais de Estradas de Rodagem (ABDER), 2013.

TAHA, R.; AL-HARTY, A.S.; AL-SHAMSI, K.; AL-ZUBEIDI, M. Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. **Journal of materials in civil engineering**, v. 14, n. 3, p. 239-245, 2002.

TANSKI, M.C. **Comportamento mecânico de material reciclado a frio com emulsão e cimento**. 2016. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

TORRES, J.C.L. **Obtenção de emulsões asfálticas convencionais e modificadas com argilas e nanoargilas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2013.

WIRTGEN GmbH. **Reciclagem a frio**: tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen. WIRTGEN GROUP: Windhagen, Alemanha, 2012. 370p.

YAN, J.; ZHU, H.; ZHANG, Z.; GAO, L.; CHARMOT, S. The theoretical analysis of the RAP aged asphalt influence on the performance of asphalt emulsion cold recycled mixes. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 444-450, 2014.

ZOLIN, I. **Curso técnico em automação industrial**: ensaios mecânicos e análises de falhas. 3. ed. Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2010.102 p.

## APÊNDICE

## APÊNDICE A – PARÂMETROS GERAIS REFERENTE ÀS AMOSTRAS DO ENSAIO DE RT, MR E RCS

RESULTADOS GERAIS DAS AMOSTRAS PARA ENSAIOS DE RT E MR - CURA EM ESTUFA									
Nomenclatura	Amostra	Umidade total	Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)	Peso (g)	Volume CP (cm <sup>3</sup> )	Massa específica teórica máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)
REF C1E2	1	8,70%	101,15	65,04	1133,20	522,62	2,17	1,99	8,00
	2	8,70%	101,26	65,19	1130,20	524,97	2,15	1,98	8,00
	3	8,70%	100,99	65,61	1132,70	525,54	2,16	1,98	8,00
	4	8,70%	101,20	65,74	1138,50	528,77	2,15	1,98	8,00
	5	8,70%	101,39	64,24	1133,60	518,67	2,19	2,01	8,00
	6	8,70%	102,18	63,03	1093,50	516,84	2,12	1,95	8,00
FP C1E2	1	8,25%	101,32	65,79	1144,30	530,43	2,16	1,99	7,62
	2	8,25%	101,83	65,78	1144,50	535,70	2,14	1,97	7,62
	3	8,25%	101,31	66,43	1147,90	535,48	2,14	1,98	7,62
	4	8,25%	101,31	66,85	1145,70	538,87	2,13	1,96	7,62
	5	8,25%	101,49	67,44	1150,60	545,56	2,11	1,95	7,62
REF C1E3	1	8,75%	101,40	67,11	1152,10	541,93	2,13	1,95	8,05
	2	8,75%	101,51	67,48	1156,30	546,10	2,12	1,95	8,05
	3	8,75%	101,03	67,91	1157,60	544,39	2,13	1,96	8,05
	4	8,75%	100,97	68,45	1148,20	548,07	2,09	1,93	8,05
FP C1E3	1	8,70%	101,38	64,96	1112,90	524,36	2,12	1,95	8,00
	2	8,70%	102,07	64,35	1105,10	526,53	2,10	1,93	8,00
	3	8,70%	101,85	64,98	1111,90	529,39	2,10	1,93	8,00
	4	8,70%	101,25	65,13	1099,30	524,38	2,10	1,93	8,00
	5	8,70%	101,26	65,67	1107,50	528,83	2,09	1,93	8,00
REF C3E2	1	9,00%	101,34	64,99	1115,80	524,19	2,13	1,95	8,26
	2	9,00%	102,01	64,07	1113,40	523,62	2,13	1,95	8,26



	3	9,00%	101,76	65,17	1155,60	530,00	2,18	2,00	8,26
FP C3E2	1	8,60%	101,32	67,21	1151,70	541,88	2,13	1,96	7,92
	2	8,60%	101,80	66,14	1153,10	538,32	2,14	1,97	7,92
	3	8,60%	101,49	66,51	1152,80	538,03	2,14	1,97	7,92
	4	8,60%	101,54	66,03	1145,90	534,68	2,14	1,97	7,92
	5	8,60%	101,48	68,10	1148,30	550,79	2,08	1,92	7,92
REF C3E3	1	8,75%	101,61	66,67	1154,80	540,61	2,14	1,96	8,05
	2	8,75%	101,46	65,77	1127,00	531,73	2,12	1,95	8,05
	3	8,75%	101,34	65,78	1119,60	530,56	2,11	1,94	8,05
	4	8,75%	101,32	66,28	1150,60	534,38	2,15	1,98	8,05
	5	8,75%	101,29	65,38	1109,00	526,81	2,11	1,94	8,05
	6	8,75%	101,18	65,29	1083,60	524,94	2,06	1,90	8,05
	7	8,75%	101,20	65,97	1131,20	530,62	2,13	1,96	8,05
	8	8,75%	101,43	67,38	1166,60	544,43	2,14	1,97	8,05
FP C3E3	1	8,75%	101,51	71,43	1168,40	578,06	2,02	1,86	8,05
	2	8,75%	102,29	68,72	1156,00	564,71	2,05	1,88	8,05
	3	8,75%	102,05	67,47	1143,00	551,84	2,07	1,90	8,05
	4	8,75%	101,34	71,89	1170,80	579,84	2,02	1,86	8,05
	5	8,75%	101,70	69,55	1163,70	564,96	2,06	1,89	8,05

**RESULTADOS GERAIS DAS AMOSTRAS PARA ENSAIOS DE RCS**

Nomenclatura	Amostra	Cura	Umidade total	Diâmetro médio (mm)	Altura média (mm)	Peso (g)	Volume CP (cm³)	Massa específica teórica máxima (g/cm³)	Massa específica aparente (g/cm³)	Vv (%)
REF C1E2	1	Estufa	8,70%	100,83	199,40	3517,80	1592,14	2,21	2,03	8,00
	2	Estufa	8,70%	101,23	199,54	3477,20	1605,93	2,17	1,99	8,00
	3	Estufa	8,70%	101,35	198,62	3473,60	1602,31	2,17	1,99	8,00
	4	Câmara úmida	8,70%	100,22	201,03	3553,90	1585,79	2,24	2,06	8,00
	5	Câmara úmida	8,70%	100,69	197,52	3531,90	1572,75	2,25	2,07	8,00
	6	Câmara úmida	8,70%	100,40	199,17	3547,80	1576,77	2,25	2,07	8,00
FP C1E2	1	Estufa	8,25%	100,49	199,15	3506,70	1579,44	2,22	2,05	7,62
	2	Estufa	8,25%	100,59	200,03	3488,40	1589,58	2,19	2,03	7,62
	3	Estufa	8,25%	100,56	200,26	3680,40	1590,46	2,31	2,14	7,62
	4	Câmara úmida	8,25%	101,95	197,19	3659,80	1609,67	2,27	2,10	7,62
	5	Câmara úmida	8,25%	100,14	198,11	3679,80	1560,27	2,36	2,18	7,62
	6	Câmara úmida	8,25%	100,86	198,30	3679,80	1584,30	2,32	2,15	7,62
	7	Câmara úmida	8,25%	100,70	193,70	3569,10	1542,64	2,31	2,14	7,62
REF C1E3	1	Estufa	8,75%	101,03	197,69	3520,00	1584,76	2,22	2,04	8,05
	2	Estufa	8,75%	101,13	202,37	3469,20	1625,49	2,13	1,96	8,05
	3	Estufa	8,75%	101,92	196,51	3477,90	1603,17	2,17	1,99	8,05
FPC1E3	1	Estufa	8,70%	100,44	196,51	3400,60	1556,95	2,18	2,01	8,00
	2	Estufa	8,70%	100,91	199,27	3399,70	1593,63	2,13	1,96	8,00
	3	Estufa	8,70%	100,80	199,32	3393,00	1590,56	2,13	1,96	8,00
REF C3E2	1	Estufa	9,00%	101,43	198,89	3563,70	1607,03	2,22	2,03	8,26
	2	Estufa	9,00%	100,66	199,99	3555,80	1591,47	2,23	2,05	8,26
	3	Estufa	9,00%	101,81	199,05	3566,20	1620,39	2,20	2,02	8,26
	4	Estufa	9,00%	100,86	199,87	3555,30	1596,84	2,23	2,04	8,26
FP C3E2	1	Estufa	8,60%	100,97	197,73	3524,00	1583,19	2,23	2,05	7,92
	2	Estufa	8,60%	100,92	201,74	3510,80	1613,70	2,18	2,00	7,92
	3	Estufa	8,60%	101,13	198,76	3531,60	1596,49	2,21	2,04	7,92
	4	Estufa	8,60%	100,85	201,18	3505,10	1606,99	2,18	2,01	7,92

REF C3E3	1	Estufa	8,75%	101,07	201,47	3573,20	1616,34	2,21	2,03	8,05
	2	Estufa	8,75%	101,22	200,96	3585,80	1617,03	2,22	2,04	8,05
	3	Estufa	8,75%	101,31	200,58	3565,20	1616,85	2,21	2,03	8,05
	4	Estufa	8,75%	101,22	200,47	3549,80	1613,09	2,20	2,02	8,05
FP C3E3	1	Estufa	8,75%	101,24	201,63	3594,80	1623,07	2,21	2,04	8,05
	2	Estufa	8,75%	100,78	201,27	3584,10	1605,48	2,23	2,05	8,05
	3	Estufa	8,75%	101,07	204,90	3537,70	1643,86	2,15	1,98	8,05
	4	Estufa	8,75%	100,80	201,73	3488,60	1609,79	2,17	1,99	8,05

NUP: 23081.119867/2022-02

Prioridade: Normal

Ato de entrega de dissertação/tese

134.334 - Dissertação e tese

### COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
2	Dissertação de mestrado (134.334)	DIS_PPGEC_2022_SANTOS_GABRIELAFANCK.pdf

### Assinaturas

13/10/2022 17:21:02

GABRIELA FANCK DOS SANTOS (Aluno de Pós-Graduação)  
07.10.03.01.0.0 - PG Engenharia Civil - Mestrado - 42002010020M0

14/10/2022 10:47:54

TATIANA CUREAU CERVO (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR)  
07.03.00.00.0.0 - VICE-DIREÇÃO DO CT - VD-CT

Código Verificador: 1992488

Código CRC: 1a5bdccd

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

