

**Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura**

Daniel Wolter Martell

**Reciclagem Profunda de Pavimentos Asfálticos com Emulsão:
Aplicação da Metodologia de Dosagem Sul-Africana a Nível
Nacional**

Porto Alegre
2022

DANIEL WOLTER MARTELL

**RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS
COM EMULSÃO: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE
DOSAGEM SUL-AFRICANA A NÍVEL NACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Prof. Dr. Washington Peres Núñez
Dr. em Engenharia pela UFRGS, Brasil
Orientador

Porto Alegre
2022

CIP - Catalogação na Publicação

Martell, Daniel Wolter
Reciclagem Profunda de Pavimentos Asfálticos com
Emulsão: Aplicação da Metodologia de Dosagem
Sul-Africana a Nível Nacional / Daniel Wolter Martell.
-- 2022.
156 f.
Orientador: Washington Peres Núñez.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Resistência ao cisalhamento. 2. Compactação
vibratória. 3. Corpos de Prova 15x30 cm. 4. Módulo de
resiliência. 5. Resistência à tração indireta. I.
Núñez, Washington Peres, orient. II. Título.

DANIEL WOLTER MARTELL

**RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS
COM EMULSÃO: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE
DOSAGEM SUL-AFRICANA A NÍVEL NACIONAL**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Obras Viárias e Hidráulicas, e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2022.

Prof. Dr. Washington Peres Núñez
Dr. em Engenharia pela UFRGS, Brasil
Orientador

Prof.^a Ângela de Moura Ferreira Danilevicz
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Kamilla Vasconcelos Savasini (USP)
PhD pela Texas A&M University, Estados Unidos

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (UFRGS)
PhD pela University of Nottingham, Reino Unido

Prof. William Fedrigo (UFRGS)
Doutor pelo PPGCI - UFRGS, Brasil

Eng. Marlova Grazziotin Johnston (DAER)
Doutora pelo PPGEC - UFRGS, Brasil

Dedico este trabalho à minha mãe Gislaine e minha avó
Melina (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Gostaria de prestar os meus mais sinceros agradecimentos ao professor Washington Peres Núñez, orientador deste trabalho. Desde o primeiro momento em que nosso contato foi retomado, após um longo período afastado das atividades acadêmicas por motivos profissionais, ele foi um grande entusiasta deste projeto. Muito obrigado professor, pelos ensinamentos e conhecimentos (não apenas acadêmicos) a mim repassados.

Gostaria também de agradecer a todos os professores do PPGCI/UFRGS, servidores extremamente dedicados e que não medem esforços para que a universidade consiga manter seu grau de excelência, ano após ano.

Aos colaboradores terceirizados da UFRGS, pessoas extremamente importantes e necessárias para que as atividades rotineiras da universidade consigam ser realizadas. Deixo aqui minha singela homenagem a todos vocês.

Aos amigos do LAPAV: PETERs, estagiários, técnicos, pesquisadores, professores. Essa equipe é simplesmente sensacional. Quero deixar aqui registrado que esse período de aproximadamente dois anos em que tive o privilégio de conviver com vocês ficará para sempre em minha memória. Não vou citar nomes para não cometer nenhuma injustiça, mas, sintam-se todos abraçados com bastante carinho. Meu muito obrigado lapavianos! Espero ter deixado boas lembranças e recordações em cada um de vocês. Gosto de acreditar que quando conhecemos alguém e, de alguma forma, impactamos essa pessoa de forma positiva, estamos no caminho certo. Quero acreditar que isso tenha ocorrido nesses anos de convívio.

À minha noiva Clarissa Maroneze Garcia. Foi ela quem me motivou, desde o primeiro momento, a retomar os estudos na UFRGS. Muitas vezes comentei, sem muita confiança, sobre a possibilidade de um dia cursar um mestrado acadêmico. Ela sempre me incentivou e, nos momentos de dificuldade, foi meu ombro amigo. Muito obrigado “mozão”, é um privilégio dividir a vida contigo.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense (IFSul), instituição da qual faço parte do quadro de servidores técnico-administrativos. Ao diretor Jeferson Wolff, que teve a sensibilidade de me conceder os 24 meses de afastamento (legalmente permitidos) para que eu conseguisse concluir este projeto com sucesso.

Às empresas Eldorado Mineração e Greca Asfaltos pelo fornecimento dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Ao laboratorista Valmir, da Eldorado Mineração, pessoa extremamente prestativa que me auxiliou nos dois dias de coleta dos materiais.

À minha mãe Gislaine e minha avó Melina (*in memoriam*), mulheres guerreiras, humildes e batalhadoras. Ensinaram-me a ter força de vontade e a correr atrás dos meus sonhos.

Aos componentes da banca de defesa desta dissertação, professores Lélío Antônio Teixeira Brito, William Fedrigo, Kamilla Vasconcelos Savasini e a engenheira Marlova Grazziotin Johnston, pelas considerações e contribuições extremamente importantes que possibilitaram o aprimoramento deste trabalho.

“No fundo, todos temos necessidade de dizer quem somos e o que é que estamos a fazer e a necessidade de deixar algo feito, porque esta vida não é eterna e deixar coisas feitas pode ser uma forma de eternidade”

(José Saramago)

RESUMO

MARTELL, D. W. **Reciclagem Profunda de Pavimentos Asfálticos com Emulsão: Aplicação da Metodologia de Dosagem Sul-Africana a Nível Nacional**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

A reciclagem profunda de pavimentos, também conhecida como *Full-Depth Reclamation* (FDR), proporciona benefícios econômicos e ambientais significativos. Em nível nacional, são escassas as normas e pesquisas que abordam essa técnica com emprego de emulsão asfáltica como agente estabilizante. Sendo assim, existem poucos parâmetros de resistência e deformabilidade disponíveis para o dimensionamento de estruturas rodoviárias com esse tipo de material. A presente pesquisa teve como objetivo principal a determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade – coesão, ângulo de atrito interno e módulo de resiliência – de duas misturas estabilizadas com emulsão asfáltica para emprego em pavimentos flexíveis. A dosagem das misturas (compostas por BGS, RAP e cimento) foi feita mediante a realização de ensaios de resistência à tração indireta, tendo sido adicionados quatro teores de emulsão: 2,9%, 3,1%, 3,3% e 3,5%. Os percentuais de RAP incorporados foram de 20% e 40%, sendo o conteúdo de cimento fixado em 1%. A resistência ao cisalhamento na compressão triaxial também foi avaliada. Foi analisada a influência do tempo de cura no módulo de resiliência triaxial. O processo de serragem realizado permitiu mapear a heterogeneidade provocada pela compactação vibratória na resistência à tração indireta e no índice de vazios ao longo do perfil dos corpos de prova 15x30 cm. De forma adicional, foi possível apurar se os parâmetros de dosagem foram, de fato, atendidos. A metodologia de dosagem aplicada foi a da República da África do Sul, constante no TG2. Os resultados obtidos mostraram que o aumento no teor de RAP promoveu uma melhoria na resistência à tração indireta. Em se tratando da resistência ao cisalhamento, a mistura com maior teor de RAP (40%) obteve um melhor comportamento, com valores de coesão e ângulo de atrito interno de 307 kPa e 40°, respectivamente. Já a mistura contendo 20% de RAP apresentou um aumento de coesão (409 kPa) e uma redução no ângulo de atrito interno (32°). Com relação aos módulos de resiliência, o aumento no conteúdo de RAP resultou em uma menor rigidez, tornando o material mais elástico. Para o menor período de cura, a mistura composta por 40% de RAP obteve um módulo médio de 1.012 MPa, enquanto a mistura com 20% de RAP alcançou 1.135 MPa. Pôde ser observado que um maior período de cura proporcionou um aumento na rigidez de ambas as misturas, devido aos processos de evaporação da água e ruptura da emulsão. No caso da mistura contendo 40% de RAP, a média do módulo foi elevada para 1.084 MPa, enquanto a mistura com 20% de RAP em sua composição atingiu um valor médio de 1.200 MPa. Os valores mais elevados de módulo de resiliência para o período de cura estendida podem ter sido influenciados pelo fenômeno da sucção. Ambos os materiais apresentaram um comportamento resiliente dependente do estado de tensões, reforçando que as misturas a frio estabilizadas com emulsão, ao receberem a incorporação de baixos teores de cimento (1% nesse caso), comportam-se como materiais granulares. Foi verificado que existe uma redução do índice de vazios e um aumento da resistência à tração indireta, com o aumento da profundidade, ao longo do perfil de um mesmo corpo de prova.

Palavras-chave: compactação vibratória; corpos de prova 15x30 cm; misturas a frio; módulo de resiliência; período de cura; resistência à tração indireta; resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

MARTELL, D. W. **Full-Depth Reclamation of Asphalt Pavements with Emulsion: Application of the South African Dosing Methodology at National Level.** 2022. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

Full-depth Reclamation, also known as FDR, provides significant economic and environmental benefits. At the national level, there are few norms and research that address this technique using asphalt emulsion as a stabilizing agent. Therefore, there are few resistance and deformability parameters available for the design of road structures with this type of material. The present research had as its main objective the determination of resistance and deformability parameters – cohesion, angle of internal friction and modulus of resilience – of two mixtures stabilized with asphalt emulsion for use in flexible pavements. The dosage of the mixtures (composed of BGS, RAP and cement) was carried out by carrying out indirect tensile strength tests, with four emulsion contents added: 2.9%, 3.1%, 3.3% and 3.5%. The percentages of incorporated RAP were 20% and 40%, with the cement content set at 1%. The shear strength in triaxial compression was also evaluated. The influence of curing time on the triaxial resilience module was analyzed. The sawing process carried out allowed mapping the heterogeneity caused by the vibratory compaction in the indirect tensile strength and in the voids index along the profile of the 15x30 cm specimens. Additionally, it was possible to determine whether the dosing parameters were, in fact, met. The applied dosage methodology was that of the Republic of South Africa, constant in TG2. The obtained results showed that the increase in the RAP content promoted an improvement in the indirect tensile strength. In terms of shear strength, the mixture with the highest RAP content (40%) performed better, with cohesion values and internal friction angles of 307 kPa and 40°, respectively. The mixture containing 20% RAP showed an increase in cohesion (409 kPa) and a reduction in the internal friction angle (32°). Regarding resilience modules, the increase in RAP content resulted in lower stiffness, making the material more elastic. For the shortest curing period, the mixture composed of 40% RAP obtained an average modulus of 1012 MPa, while the mixture with 20% RAP reached 1135 MPa. It could be observed that a longer period provided an increase in the rigidity of both mixtures, due to the processes of water evaporation and emulsion rupture. In the case of the mixture containing 40% RAP, the average modulus was increased to 1084 MPa, while the mixture with 20% RAP in its composition reached an average value of 1200 MPa. The higher resilience modulus values for the extended curing period may have been influenced by the suction phenomenon. Both materials showed a resilient behavior dependent on the state of stress, reinforcing that the cold mixtures stabilized with emulsion, when receiving the incorporation of low cement contents (1% in this case), behave like granular materials. It was found that there is a reduction in the void ratio and an increase in indirect tensile strength, with increasing depth, along the profile of the same specimen.

Keywords: vibratory compaction; test specimens 15x30 cm; cold mixtures; resilience module; curing period; indirect tensile strength; shear strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma delimitação da pesquisa	16
Figura 2 – Dispersão do ligante asfáltico entre as partículas do agregado.....	19
Figura 3 – Amostra estabilizada com emulsão (à esquerda) e espuma (à direita).....	20
Figura 4 – Valores específicos de adesão entre os materiais em uma estabilização com emulsão asfáltica	21
Figura 5 – Ligantes asfálticos mais empregados na reciclagem de pavimentos na América do Norte (EUA e Canadá)	23
Figura 6 – Fíleres ativos mais empregados na reciclagem do tipo FDR na América do Norte (EUA e Canadá)	23
Figura 7 – Comportamento dos materiais utilizados na construção de pavimentos.....	26
Figura 8 – Processo da reciclagem do tipo FDR	27
Figura 9 – Equipamentos executando uma FDR com adição de emulsão asfáltica	29
Figura 10 – Reaproveitamento de RAP no continente europeu no ano de 2020.....	32
Figura 11 – Percentual de RAP em misturas recicladas a frio com ligantes asfálticos.....	33
Figura 12 – Relação entre o índice de vazios e a resistência à tração indireta.....	38
Figura 13 – Influência do conteúdo de RAP no teor de projeto de misturas BSM.....	38
Figura 14 – Amostras submetidas ao ensaio triaxial monotônico (ruptura à 60°)	41
Figura 15 – Fluxograma método de dosagem da SABITA	53
Figura 16 – Avaliação da coesão retida (RetC).....	56
Figura 17 – Resposta típica de um corpo de prova em um ensaio triaxial de cargas repetidas	63
Figura 18 – Representação do diagrama p-q	67
Figura 19 – Programa experimental da presente pesquisa	70
Figura 20 – Maciço rochoso granítico (à esquerda) e usina utilizada na produção da BGS (à direita)	71
Figura 21 – Localização (à esquerda) e visão geral do depósito de RAP (à direita).....	72
Figura 22 – Detalhe das amostras de BGS (à esquerda) e RAP (à direita)	72
Figura 23 – Fluido (à esquerda) e mistura com 10% de fluido adicionado (à direita)	76
Figura 24 – Ramo seco (à esquerda) e úmido (à direita) da curva de compactação	76
Figura 25 – Molde tripartido (à esquerda acima), detalhe da ponteira (à esquerda abaixo) e visão geral do pórtico e do martelo demolidor (à direita)	79
Figura 26 – Corpos de prova 150x95mm em imersão (à esquerda) e logo após concluída a cura controlada sem imersão (à direita)	80
Figura 27 – Prensa utilizada nos ensaios ITS (à esquerda) e corpos de prova rompidos (à direita)	81
Figura 28 – Corpos de prova 100x200mm em imersão (à esquerda) e logo após a conclusão da cura controlada sem imersão (à direita)	84

Figura 29 – Equipamento MTS (à esquerda) e detalhe da σ_3 sendo aplicada em um corpo de prova (à direita)	86
Figura 30 – Compactação no molde de parede contínua (à esquerda), processo de extrusão (ao centro) e aparência de um corpo de prova 150x300mm (à direita).....	88
Figura 31 – Colocação da membrana de borracha (à esquerda) e ensaio triaxial de módulo de resiliência em andamento (à direita)	88
Figura 32 – Serra circular (à esquerda) e aspecto dos corpos de prova após o corte ser concluído (à direita).....	89
Figura 33 – Equipamento (à esquerda) e amostras (à direita) empregadas na execução do ensaio Rice	91
Figura 34 – Curvas granulométricas dos materiais coletados em campo.....	93
Figura 35 – Curvas granulométricas das misturas.....	96
Figura 36 – Curvas de compactação das misturas.....	97
Figura 37 – Controle estatístico das densidades dos corpos de prova ITS.....	101
Figura 38 – Influência do tempo de compactação e do número de camadas na moldagem dos corpos de prova ITS	103
Figura 39 – Grau de compactação <i>versus</i> ITS das misturas.....	104
Figura 40 – Efeito da incorporação de RAP na ITS das misturas.....	105
Figura 41 – ITSR das misturas <i>versus</i> teor de emulsão.....	107
Figura 42 – ITSR das misturas <i>versus</i> absorção de água	109
Figura 43 – Definição dos teores de projeto das misturas.....	112
Figura 44 – Graus de compactação dos corpos de prova 10x20cm moldados com o mesmo tempo de vibração	116
Figura 45 – Controle estatístico das densidades dos corpos de prova 10x20cm.....	117
Figura 46 – Relação entre tensões obtidas ($\sigma_{1,f}$ <i>versus</i> σ_3).....	119
Figura 47 – Corpos de prova rompidos no ensaio triaxial de carregamento monotônico: rupturas por embarrilamento (à esquerda e ao centro) e um possível plano de ruptura após a remoção do corpo de prova da estufa.....	122
Figura 48 – Resultados da coesão retida (RetC).....	123
Figura 49 – Resultados dos ensaios triaxiais de módulo de resiliência.....	126
Figura 50 – Módulo de resiliência <i>versus</i> teor de umidade dos corpos de prova.....	128
Figura 51 – Perda de peso dos corpos de prova 15x30cm ao longo do tempo.....	129
Figura 52 – Distribuição da ITS ao longo da profundidade dos corpos de prova.....	133
Figura 53 – Distribuição do e% ao longo da profundidade dos corpos de prova.....	137
Figura 54 – Tendências obtidas entre a ITS e o e%	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características e parâmetros de cisalhamento das misturas 100% RAP estudadas por Orosa <i>et al.</i> (2022a).....	40
Tabela 2 – Resumo de alguns artigos envolvendo o estudo de misturas recicladas a frio com incorporação de emulsão asfáltica.....	42
Tabela 3 – Diretrizes de algumas normativas brasileiras para reciclagem de pavimentos com adição de ligantes asfálticos	47
Tabela 4 – Diretrizes para adição da emulsão asfáltica pelo método da Wirtgen.....	49
Tabela 5 – Parâmetros mínimos para dosagem de misturas estabilizadas com ligantes asfálticos (método da Austroads)	52
Tabela 6 – Resumo de algumas metodologias para dosagem de misturas recicladas a frio com incorporação de emulsão asfáltica.....	61
Tabela 7 – Classificação de desempenho dos BSM a partir das propriedades de cisalhamento	68
Tabela 8 – Resumo das misturas estudadas no presente trabalho	70
Tabela 9 – Corpos de prova moldados para determinação da ITS	77
Tabela 10 – Corpos de prova moldados para determinação da resistência ao cisalhamento (c e ϕ).....	82
Tabela 11 – Corpos de prova moldados para avaliação do tempo de cura no MR	87
Tabela 12 – Corpos de prova 150x100mm obtidos a partir do processo de serragem.....	90
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de caracterização da BGS	94
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de caracterização da emulsão asfáltica	95
Tabela 15 – Parâmetros obtidos na etapa de caracterização das misturas.....	98
Tabela 16 – Moldagens para determinação da ITS na mistura 60%BGS_40%RAP	99
Tabela 17 – Moldagens para determinação da ITS na mistura 80%BGS_20%RAP	100
Tabela 18 – Número de camadas e tempo de compactação aplicado na moldagem dos corpos de prova ITS	101
Tabela 19 – Características dos conjuntos de corpos de prova considerados para determinação dos teores de projeto das misturas.....	113
Tabela 20 – Moldagens para determinação dos parâmetros de cisalhamento na mistura 60%BGS_40%RAP.....	114
Tabela 21 – Moldagens para determinação dos parâmetros de cisalhamento na mistura 80%BGS_20%RAP.....	115
Tabela 22 – Resultados obtidos nos ensaios triaxiais de carregamento monotônico	118
Tabela 23 – Parâmetros de cisalhamento das misturas estudadas	119
Tabela 24 – Características dos corpos de prova moldados para realização dos ensaios triaxiais de módulo de resiliência.....	124

Tabela 25 – Parâmetros de regressão e coeficiente de determinação R^2 para os diferentes modelos de ajuste	131
Tabela 26 – Densidade máxima medida (G_{mm}) das misturas estudadas.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABEDA: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos

ANP: Agência Nacional do Petróleo

ANTT: Agência Nacional de Transportes Terrestres

ARRA: *Asphalt Recycling and Reclaiming Association*

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

BGS: Brita graduada simples

BGTC: Brita graduada tratada com cimento

BSM: *Bitumen Stabilized Materials*

c: Coesão

CAP: Cimento asfáltico de petróleo

CBTM: *Cement Base Treated Material*

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CIR: *Cold In-place Recycling*

CO₂: Dióxido de carbono

DEINFRA-SC: Departamento de Infraestrutura do Estado de Santa Catarina

DER-PR: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná

DER-SP: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DP: Deformação permanente

e%: Índice de vazios

E*: Módulo complexo

EA: Equivalente de areia

EAPA: *European Asphalt Pavement Association*

EE: Escola de Engenharia

ϕ : Ângulo de atrito interno

FDR: *Full-Depth Reclamation*

FN: *Flow Number*

GC: Grau de compactação

$\gamma_{dm\acute{a}x.}$: Peso específico aparente seco máximo

G_{mm}: Densidade máxima medida

HMA: *Hot Mix Asphalt*
IP: Índice de plasticidade
ISC: Índice de Suporte Califórnia
ITS: *Indirect Tensile Strength*
ITSR: *Indirect Tensile Strength Ratio*
WMA: *Warm Mix Asphalt*
LAGEOtec: Laboratório de Geotecnologia
LAPAV: Laboratório de Pavimentação
LL: Limite de liquidez
LP: Limite de plasticidade
LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*
MDD: *Maximum Dry Density*
M-E: Mecanístico empírico
MR: Módulo de resiliência
MTS: *Materials Test Systems*
NAPA: *National Asphalt Pavement Association*
NBR: Norma brasileira
NCHRP: *National Cooperative Highway Research Program*
NP: Não plástico
OFC: *Optimum Fluid Content*
PCA: *Portland Cement Association*
PPGCI: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura
RAP: *Reclaimed Asphalt Pavement*
RCD: Resíduos de construção e demolição
RCS: Resistência à compressão simples
RetC: Coesão retida
RL: Ruptura lenta
RT: Resistência à tração indireta
SABITA: *Southern African Bitumen Association*
 $\sigma_{1,f}$: Tensão principal de ruptura
 σ_3 : Tensão confinante
TG2: *Technical Guideline*
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul
 $w_{ót}$: Umidade ótima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	DELINEAMENTO DA PESQUISA	16
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2	RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	18
2.1	ASPECTOS GERAIS DA ESTABILIZAÇÃO BETUMINOSA NA RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	18
2.2	PRINCIPAIS AGENTES ESTABILIZANTES E FÍLERES ATIVOS EMPREGADOS NA RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	22
2.3	RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS	24
2.3.1	Conceituação e aspectos gerais	24
2.3.2	Processo executivo	26
2.3.3	Histórico de aplicação e panorama atual.....	29
2.3.3.1	Cenário nacional	29
2.3.3.2	Cenário internacional.....	30
2.4	PESQUISAS RECENTES SOBRE RECICLAGEM COM LIGANTES ASFÁLTICOS.....	33
3	DOSAGEM DE MISTURAS RECICLADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA	46
3.1	CENÁRIO NACIONAL	46
3.2	CENÁRIO INTERNACIONAL	48
3.2.1	Método de dosagem da Wirtgen	48
3.2.2	Método de dosagem da Austroads.....	50
3.2.3	Método de dosagem da Southern African Bitumen Association (SABITA).....	53
3.2.4	Método de dosagem da Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA)..	56
3.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS METODOLOGIAS DE DOSAGEM ...	59

4	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E DEFORMABILIDADE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	62
4.1	MÓDULO DE RESILIÊNCIA	62
4.2	PARÂMETROS DE CISALHAMENTO	65
5	MATERIAIS E MÉTODOS	69
5.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
5.2	MATERIAIS	71
5.2.1	Materiais procedentes da coleta de campo (RAP e BGS).....	71
5.2.2	Cimento	72
5.2.3	Emulsão asfáltica.....	73
5.3	MÉTODOS	73
5.3.1	Caracterização dos agregados (RAP e BGS).....	73
5.3.1.1	Análise granulométrica (RAP e BGS).....	73
5.3.1.2	Ensaio de compactação (BGS)	73
5.3.1.3	Equivalente de areia (BGS)	74
5.3.1.4	Determinação da abrasão “Los Angeles” (BGS).....	74
5.3.2	Caracterização da emulsão asfáltica	74
5.3.2.1	Determinação da viscosidade Saybolt Furol.....	74
5.3.2.2	Determinação da sedimentação	74
5.3.2.3	Determinação da peneiração	74
5.3.2.4	Ensaio de carga de partícula	74
5.3.2.5	Determinação do teor do resíduo seco	74
5.3.2.6	Determinação do pH	74
5.3.3	Caracterização das misturas (RAP + BGS + cimento + emulsão).....	75
5.3.3.1	Granulometria das misturas	75
5.3.3.2	Ensaio de compactação	75
5.3.4	Dosagem das misturas	77
5.3.4.1	Resistência à tração indireta (ITS).....	77
5.3.4.2	Resistência ao cisalhamento	81
5.3.5	Avaliação do tempo de cura no módulo de resiliência das misturas	86
5.3.6	Verificação adicional da dosagem das misturas.....	89
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	92
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS (RAP E BGS).....	92
6.1.1	Análise granulométrica (RAP e BGS).....	92

6.1.2	Outros ensaios de caracterização (BGS)	93
6.2	CARACTERIZAÇÃO DA EMULSÃO ASFÁLTICA	94
6.3	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS	95
6.3.1	Granulometria das misturas	95
6.3.2	Ensaio de compactação	96
6.4	DOSAGEM DAS MISTURAS	98
6.4.1	Resistência à tração indireta (ITS)	98
6.4.1.1	Considerações sobre o processo de compactação.....	98
6.4.1.2	Influência do grau de compactação na resistência à tração indireta (ITS) ...	104
6.4.1.3	Efeito da incorporação de RAP na resistência à tração indireta (ITS)	105
6.4.1.4	Influência do teor de emulsão na relação entre as resistências à tração indireta (ITSR)	106
6.4.1.5	Influência da absorção de água na relação entre as resistências à tração indireta (ITSR).....	108
6.4.1.6	Definição dos teores de projeto.....	111
6.4.2	Resistência ao cisalhamento	114
6.4.2.1	Considerações sobre o processo de compactação.....	114
6.4.2.2	Determinação da coesão (c) e do ângulo de atrito interno (ϕ).....	118
6.4.2.3	Avaliação da coesão retida (RetC).....	122
6.5	ENSAIOS TRIAXIAIS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA	123
6.5.1	Considerações sobre o processo de compactação	124
6.5.2	Avaliação do tempo de cura na rigidez das misturas	125
6.5.3	Evolução da perda de umidade em função do tempo de cura	129
6.5.4	Modelagem do comportamento resiliente das misturas	131
6.6	VERIFICAÇÃO ADICIONAL DA DOSAGEM DAS MISTURAS	132
6.6.1	Variação da resistência à tração indireta (ITS) ao longo do perfil dos corpos de prova	132
6.6.2	Variação do índice de vazios (e%) ao longo do perfil dos corpos de prova	135
6.6.3	Resistência à tração indireta (ITS) versus índice de vazios (e%)	137
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	140
7.1	CONCLUSÕES	140
7.2	SUGESTÕES	143
	REFERÊNCIAS	145

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o contexto e a justificativa da pesquisa, seus objetivos, seu delineamento e sua estrutura.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

A engenharia civil pode ser considerada um dos pilares da economia mundial. O porte atingido pela indústria da construção tem sido alcançado por meio da utilização de inúmeros recursos naturais gerando, historicamente, um grande ônus ambiental.

O consumo de matérias-primas vem crescendo ao longo das últimas décadas. O aumento populacional, o desenvolvimento de novas indústrias e tecnologias, o crescimento das economias globais bem como a expansão da infraestrutura necessária para proporcionar uma qualidade de vida adequada aos habitantes do planeta são alguns dos fatores que podem ser citados como colaboradores desse cenário. Em um futuro próximo, a não adoção de medidas mitigatórias para reversão desse quadro poderá aprofundar as mudanças climáticas, ocasionar um aumento da contaminação atmosférica, reduzir a biodiversidade e, em uma situação limite, levar ao esgotamento dos recursos naturais.

Cientes desse panorama, os pesquisadores e a comunidade acadêmica vêm desenvolvendo estudos objetivando o reaproveitamento e a busca por materiais alternativos para construção de novas obras. Na área da pavimentação, a utilização de resíduos passa por sua incorporação nos materiais constituintes das diversas camadas do pavimento. O panorama apresentado até o momento destaca o esforço que vem sendo feito pelos mais diversos setores no intuito de viabilizar o reaproveitamento de resíduos na engenharia rodoviária. É dentro desse contexto que a reciclagem de pavimentos ganha relevância.

O Brasil ainda possui uma malha viária extremamente malconservada, sendo necessários investimentos robustos para reabilitação ou restauração das rodovias já existentes. Além disso, a nível mundial, as demandas por reabilitação ou restauração de pavimentos parecem cada vez mais exceder a necessidade de construção de novas estradas. Sendo assim, a reciclagem de

pavimentos pode auxiliar no processo de recuperação da infraestrutura nacional e vêm, ao que parece, ganhando maior visibilidade e notoriedade internacional.

A reciclagem profunda de pavimentos, também conhecida como FDR (da sigla em inglês *Full-Depth Reclamation*) proporciona benefícios econômicos e ambientais significativos. Isso é alcançado mediante a redução no consumo de agregados virgens, diminuindo a exploração de maciços rochosos. Por aproveitar materiais de boa qualidade já existentes na estrutura do pavimento, a FDR também possibilita que menos material seja transportado para obra, reduzindo os volumes de transporte, custo de construção bastante considerável em obras de grande escala. A geração de resíduos na obra também é atenuada, principalmente de fresado asfáltico (RAP, da sigla em inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*), haja vista que grande parte das soluções de restauração ou reabilitação contemplam o uso de máquinas fresadoras para recuperação da camada de rolamento, gerando depósitos de RAP consideráveis ao longo da via. É possível citar, ainda, outros benefícios obtidos como, por exemplo, economia de energia, redução na emissão de gases para atmosfera (dióxido de carbono CO₂ – medida universal de gases do efeito estufa), menor consumo de combustível, redução no tempo de construção e menores interrupções ao tráfego. Dessa forma, a reciclagem de pavimentos contribui para o desenvolvimento sustentável do planeta.

Além dos aspectos já elencados, outro fator que motivou a escolha do presente tema remete à escassez de normativas e pesquisas brasileiras acerca da FDR com emprego de emulsão asfáltica. Apesar de ser utilizada no Brasil há algumas décadas, grande parte dos estudos desenvolvidos até o momento envolvendo a FDR consideram a incorporação de cimento Portland ou do asfalto espumado como agente estabilizante. Dessa forma, as especificações de serviço e normativas brasileiras carecem de um procedimento adequado para dosagem das misturas recicladas com emulsão. Cabe destacar, ainda, a inexistência no território nacional de parâmetros de resistência e deformabilidade para o dimensionamento. O resultado prático, infelizmente, é o emprego de diferentes métodos de dosagem e de diversos critérios para o dimensionamento das estruturas rodoviárias, situação que pode acabar comprometendo o sucesso dos resultados obtidos com a incorporação de emulsão asfáltica na FDR.

Quanto aos parâmetros necessários para o dimensionamento mecânico-empírico (M-E) das camadas recicladas, pode-se afirmar que há uma carência de informações a nível nacional, ou seja, o “banco de dados” e a literatura disponíveis para os projetistas dimensionarem esse tipo

de solução é insatisfatório. Sendo assim, parece oportuno que pesquisas envolvendo misturas recicladas com emulsão asfáltica sejam desenvolvidas.

Levando-se em consideração todos os fatores elencados e buscando contribuir com essa área do conhecimento, a presente pesquisa se propõe a aplicar a metodologia de dosagem de misturas estabilizadas com emulsão asfáltica utilizada na República da África do Sul. Também serão obtidos os parâmetros para o dimensionamento M-E das misturas estudadas. A realização desse estudo poderá incentivar o desenvolvimento de pesquisas nacionais nessa temática, colaborando com críticas e sugestões construtivas acerca da metodologia de dosagem utilizada bem como contribuir com a criação de um “banco de dados” nacional, fornecendo parâmetros de dimensionamento para camadas recicladas com a técnica FDR, encorajando projetistas e órgãos rodoviários nacionais a empregarem esse tipo de solução.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da presente pesquisa consiste na determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade – coesão, ângulo de atrito interno e módulo de resiliência – de duas misturas estabilizadas com emulsão asfáltica para emprego em pavimentos flexíveis.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral fosse alcançado, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

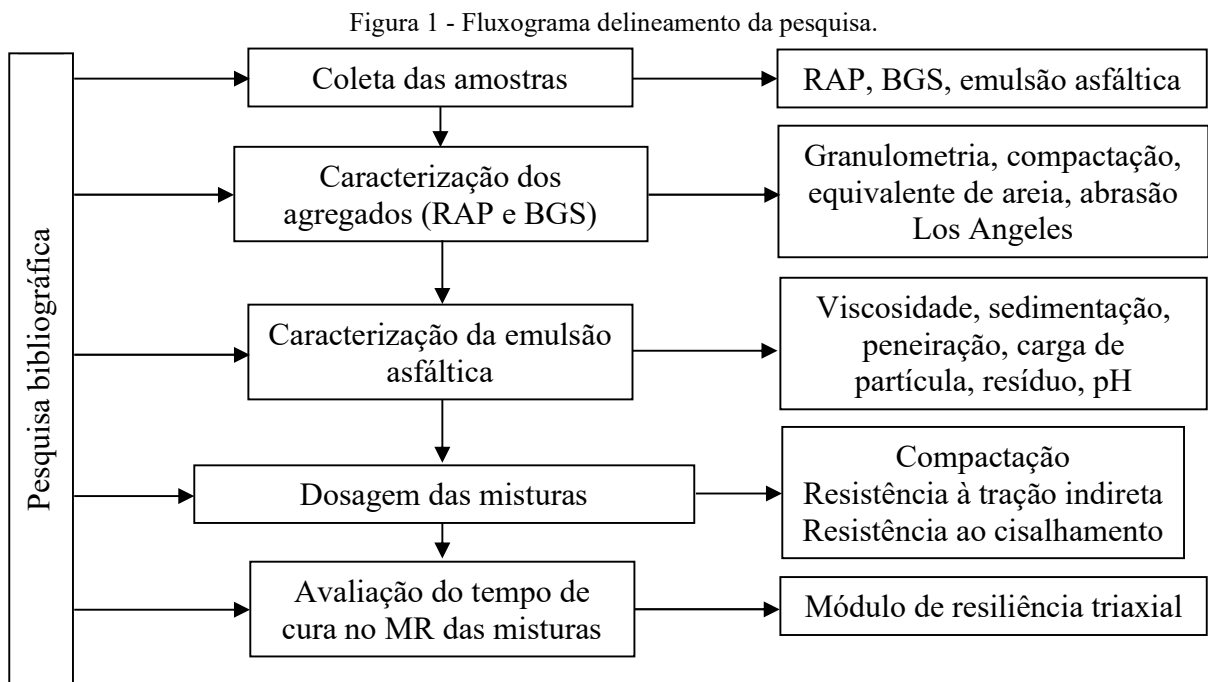
- a) Realizar o processo de dosagem das misturas estudadas (otimização do teor de emulsão asfáltica);
- b) Verificar o desempenho das misturas em termos de resistência à tração indireta;
- c) Avaliar a resistência ao cisalhamento na compressão triaxial das misturas;
- d) Avaliar a influência do tempo de cura no módulo de resiliência das misturas.

Feita a apresentação dos objetivos da pesquisa, o próximo item exhibe o delineamento da mesma, ou seja, quais as etapas envolvidas no desenvolvimento do presente trabalho.

1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O presente trabalho foi planejado de acordo com as etapas apresentadas a seguir. Na figura 1, é apresentado um fluxograma contendo o delineamento da pesquisa.

- a) Pesquisa bibliográfica;
- b) Coleta das amostras;
- c) Caracterização dos agregados;
- d) Caracterização da emulsão asfáltica;
- e) Dosagem das misturas (BGS + RAP + cimento + emulsão asfáltica);
- f) Avaliação do tempo de cura no módulo de resiliência das misturas.



Fonte: elaborado pelo autor.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho se encontra dividido em sete capítulos. Neste primeiro capítulo, intitulado introdução, foi apresentado o contexto e a justificativa do tema de pesquisa. Também foram expostos os objetivos geral e específicos do presente estudo, além do seu delineamento e estrutura.

No capítulo 2, denominado “Reciclagem de pavimentos”, são abordados alguns conceitos importantes a respeito dessa técnica. Cabe destacar que foi dada especial atenção ao detalhamento da FDR, haja vista ser o tipo de solução considerada no presente estudo. Informações acerca dos diferentes métodos de reciclagem, seu histórico de aplicação, os principais agentes estabilizantes e fileres ativos utilizados, bem como considerações acerca do processo executivo, são encontradas nesse capítulo. Também é feita a apresentação do panorama atual, em níveis nacional e internacional, da reciclagem de pavimentos, além de serem citadas algumas pesquisas recentes que vêm sendo realizadas.

O capítulo 3, intitulado “Dosagem de misturas recicladas com emulsão asfáltica”, traz algumas normativas nacionais que abordam esse tema. Em um segundo momento, são apresentadas metodologias internacionais utilizadas na dosagem de materiais estabilizados com emulsão. Ao final do capítulo, são discutidas as principais diferenças e similaridades existentes entre os diferentes métodos.

O quarto capítulo trata dos parâmetros a serem considerados em um dimensionamento M-E de pavimentos. São abordados os conceitos de módulo de resiliência (MR), coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ), parâmetros indispensáveis para a elaboração de um projeto confiável e seguro.

No quinto capítulo, “Materiais e métodos”, é detalhado o programa experimental da pesquisa. Também são caracterizados os materiais utilizados no presente estudo bem como as metodologias empregadas, tanto na cura das misturas quanto na realização dos ensaios.

A apresentação e análise dos resultados são feitas no capítulo seis. Os resultados obtidos nesse estudo foram comparados com aqueles disponíveis na literatura, oriundos de diversas pesquisas citadas na revisão bibliográfica, mais especificamente nos itens 2.3 e 2.4 desta dissertação.

O último capítulo destaca as conclusões obtidas e apresenta algumas sugestões para trabalhos futuros que visem dar continuidade a esse tema de pesquisa.

2 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Este capítulo apresenta os principais aspectos envolvidos na reciclagem de pavimentos, dando-se ênfase para a técnica FDR com adição de emulsão asfáltica.

2.1 ASPECTOS GERAIS DA ESTABILIZAÇÃO BETUMINOSA NA RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

De acordo com a *Southern African Bitumen Association* (SABITA, 2020), materiais estabilizados com betume, também chamados BSMs – da sigla em inglês *Bitumen Stabilized Materials* – são materiais de pavimentação tratados com emulsão asfáltica ou espuma de asfalto, sendo que os materiais comumente tratados incluem materiais granulares, materiais previamente estabilizados com cimento e RAP. Os autores relatam que as quantidades de ligante residual envolvidos na estabilização tipicamente não excedem 2,5%, em massa, do agregado seco. Na maioria dos casos, um filer ativo como cimento ou cal hidratada também é adicionado à mistura. Os autores destacam que a adição de cimento nunca deve exceder o teor de 1% pois, caso um percentual maior seja adicionado, o material passará a se comportar e deverá ser considerado como um material estabilizado com cimento e não com emulsão.

A compreensão dos diversos fatores que interferem no comportamento dos BSMs vem sendo objeto de diversos estudos desde a época em que essa técnica passou a ser utilizada. A adição de materiais asfálticos resulta em um aumento na resistência dos materiais estabilizados, mediante o incremento da sua coesão, além de reduzir a susceptibilidade à umidade dos mesmos, devido ao revestimento das partículas por um filme de ligante asfáltico.

O trabalho de Ingles e Metcalf (1972) *apud* Gondim (2008) apresenta uma constatação importante. De acordo com os autores, esses dois fenômenos são antagônicos pois, quanto mais delgadas as películas de ligante formadas, maior a resistência da mistura. Por outro lado, quanto maior a espessura da película, mais efetiva será a mistura para resistir aos efeitos deletérios da água. Elevados teores de ligante acabam por lubrificar as partículas do agregado, evitando o entrosamento dos grãos e, por consequência, causando uma redução na resistência da mistura.

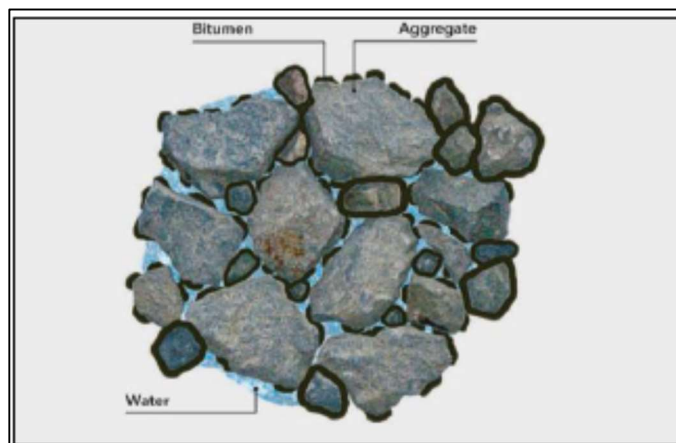
A maneira pela qual o ligante é disperso entre as partículas é diferente, a depender do tipo de material asfáltico empregado. Dessa maneira, são apresentadas abaixo as principais

características do processo de dispersão quando o material é estabilizado com emulsão ou espuma de asfalto (SABITA, 2020):

- a) Emulsão asfáltica: de forma semelhante à água, a emulsão umedece as partículas do material. Uma vez que as partículas mais finas são responsáveis pelas maiores superfícies específicas, a emulsão se concentra de forma efetiva nessas partículas, sendo que as frações mais grossas recebem muito pouco ligante, resultando em películas de revestimento menos espessas ou descontínuas. Além disso, existe uma atração polar entre a emulsão e o agregado. Isso é resultado da carga aplicada pelo agente emulsificante às gotículas de ligante na emulsão, a menos que essa carga seja rompida por algum tipo de filer ativo;
- b) Espuma de asfalto: pequenas lascas de ligante são criadas quando as bolhas de espuma estouram ao entrar em contato com os agregados. Essas lascas se dispersam exclusivamente entre as frações mais finas quando a espuma de asfalto é misturada com materiais granulares. De forma adicional, o ligante asfáltico tem uma afinidade excepcional com o filer ativo.

A figura 2 ilustra esquematicamente o processo de dispersão do ligante asfáltico entre as frações do agregado. O trabalho da SABITA (2020) relata que, quando é empregada espuma de asfalto, a compactação do material produz “pontos de solda” que ligam as partículas. Já quando é utilizada emulsão, os “pontos de solda” são criados durante o seu processo de ruptura.

Figura 2 - Dispersão do ligante asfáltico entre as partículas do agregado.



Fonte: SABITA, 2020.

Kuchiishi (2019) cita que a emulsão asfáltica e a espuma de asfalto são produtos distintos em termos de produção e dispersão e apresenta uma figura retratando a diferença visual na distribuição do ligante asfáltico em duas amostras, sendo uma estabilizada com emulsão e outra com espuma. Essa situação é ilustrada na figura 3. De acordo com o autor, no material

estabilizado com emulsão é possível verificar que uma fina camada de ligante recobre completamente a superfície dos agregados. Já no caso em que a espuma é adicionada, prevalece o aspecto não contínuo do ligante, sendo a amostra caracterizada por ligações localizadas.

Figura 3 - Amostra estabilizada com emulsão (à esquerda) e espuma (à direita).



Fonte: KUCHIISHI, 2019.

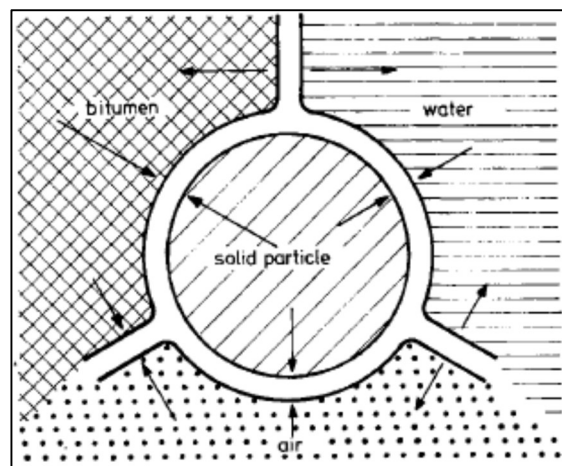
O trabalho de Kézdi (1979) buscou explicar os principais aspectos físico-químicos e mecânicos envolvidos na estabilização com ligantes asfálticos. De acordo com o autor, ao se misturar partículas de um agregado com água e ligante, processos físicos e químicos são iniciados. No caso dos materiais granulares, o objetivo principal consiste em revestir os grãos individuais com um filme de ligante asfáltico fino o suficiente para evitar que haja uma redução excessiva no atrito entre as partículas quando as mesmas são deslocadas. Por outro lado, esse filme deve ser espesso o suficiente para permitir que o efeito adesivo intergranular se manifeste. O autor ainda destaca que essa situação ocorre quando a tensão que atua continuamente na partícula do agregado é capaz de conduzir, de forma lenta, o ligante asfáltico para fora da região ao redor dos pontos de contato entre as partículas revestidas, fazendo com que as partículas sólidas fiquem em contato direto.

Considerando-se que as tensões cisalhantes afetam esse sistema, a atuação simultânea das tensões normais e tangenciais acaba por romper a película de ligante asfáltico em diversos pontos de contato entre os grãos, fazendo com que resistências de atrito consideráveis sejam estabelecidas. Quando esse movimento é interrompido, a película acaba sendo restaurada gradativamente e, devido ao fato de o entorno do ponto de contato ser “protegido” em função da elevada adesão do ligante, a água não consegue penetrar nessa área, fazendo com que o efeito coesivo seja reestabelecido (KÉZDI, 1979).

Entre as partículas revestidas por ligante asfáltico, água e ar poderão ser encontrados. De acordo com Buocz e Csagoly (1961) *apud* Kézdi (1979), grãos minerais completamente secos ou contendo pequena quantidade de água dificilmente irão se misturar com o ligante e, caso isso ocorra, será em um ritmo bastante lento. Materiais com elevados teores de água também irão apresentar essa limitação. Todavia, os autores destacam que, em havendo um conteúdo de água satisfatório, os grãos dos agregados poderão ser prontamente e eficientemente misturados, resultando em partículas revestidas por asfalto residual de forma relativamente uniforme.

Kézdi (1979) destaca que esse fenômeno pode ser explicado em função dos valores de tensão superficial e da energia de umedecimento existente entre as partículas do agregado. Segundo o autor, independentemente do material a ser utilizado como agente estabilizante, se o objetivo for o revestimento de outro material, isso só irá ocorrer se a adesão entre os dois materiais exceder a coesão do material de revestimento. A figura 4 mostra a afinidade existente entre os diversos materiais em um processo de estabilização com emulsão.

Figura 4 - Valores específicos de adesão entre os materiais em uma estabilização com emulsão asfáltica.



Fonte: KÉZDI, 1979.

Baseado na figura 4, Kézdi (1979) fez algumas considerações:

- a) Se o material estiver seco ou levemente umedecido, uma parcela considerável dos grãos estará cercada somente por ar, sendo a água armazenada apenas em determinados locais de forma pontual. Dessa maneira, os gases atmosféricos irão aderir fortemente à superfície das partículas sólidas e, caso a adição da emulsão seja feita sob essas condições, a mesma não será capaz de deslocar toda a quantidade de ar e, sendo assim, apenas uma pequena fração da superfície do agregado exibirá uma adesão por contato direto e será revestida pelo ligante;

- b) No caso de haver muita água disponível, ela estará presente não apenas como uma película envolvendo as partículas do material e acabará preenchendo a maior parte dos vazios intergranulares. Dessa maneira, a fim de criar uma adesão entre o ligante e as partículas do agregado, essa água deverá ser inicialmente expulsa dos vazios, o que pode ser impossível devido às diferenças de adesão;
- c) Em uma situação ideal de umidade, quando os vazios intergranulares possuem uma proporção favorável de água e de ar, a ação repulsiva entre esses dois elementos faz com que o ligante seja capaz de encontrar um caminho possível ao longo desses vazios alcançando, dessa forma, a superfície das partículas. Ao encontrar as partículas sólidas, o ligante é atraído em função da forte adesão existente entre ambos, provocando o recobrimento dos grãos e atingindo o efeito desejado. O sucesso desse processo é influenciado, em parte, pela magnitude das forças de atração e, até certo ponto, pela superfície das partículas.

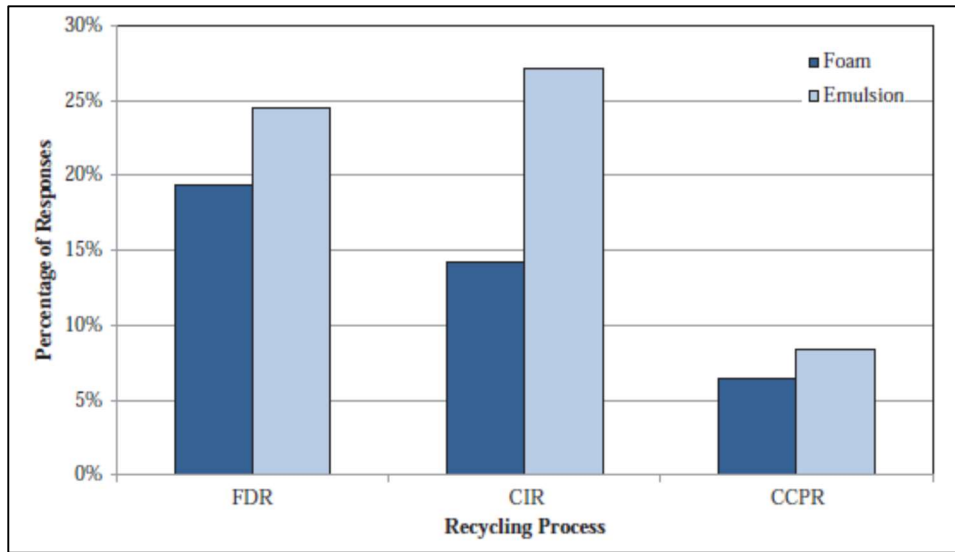
Após a apresentação do conceito e dos mecanismos envolvidos na estabilização betuminosa, o próximo item exhibe um panorama atual sobre os principais agentes estabilizantes e fíleres ativos empregados na reciclagem de pavimentos.

2.2 PRINCIPAIS AGENTES ESTABILIZANTES E FÍLERES ATIVOS EMPREGADOS NA RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

NCHRP (2021) realizou um levantamento sobre os principais agentes estabilizantes e fíleres ativos empregados na reciclagem de pavimentos na América do Norte (EUA e Canadá). A figura 5 apresenta as informações coletadas pela pesquisa. Vale destacar que as siglas FDR (*Full-Depth Reclamation*), CIR (*Cold In-place Recycling*) e CCPR (*Cold Central Plant Recycling*) se referem, respectivamente, a reciclagem profunda, reciclagem a frio *in situ* e reciclagem a frio em usina central. É possível compreender que, independentemente do tipo de reciclagem executada, a emulsão asfáltica (*emulsion*) vem sendo empregada com maior frequência quando comparada à espuma de asfalto (*foam*). Cabe destacar que essa diferença é mais acentuada para a reciclagem a frio *in situ* (CIR).

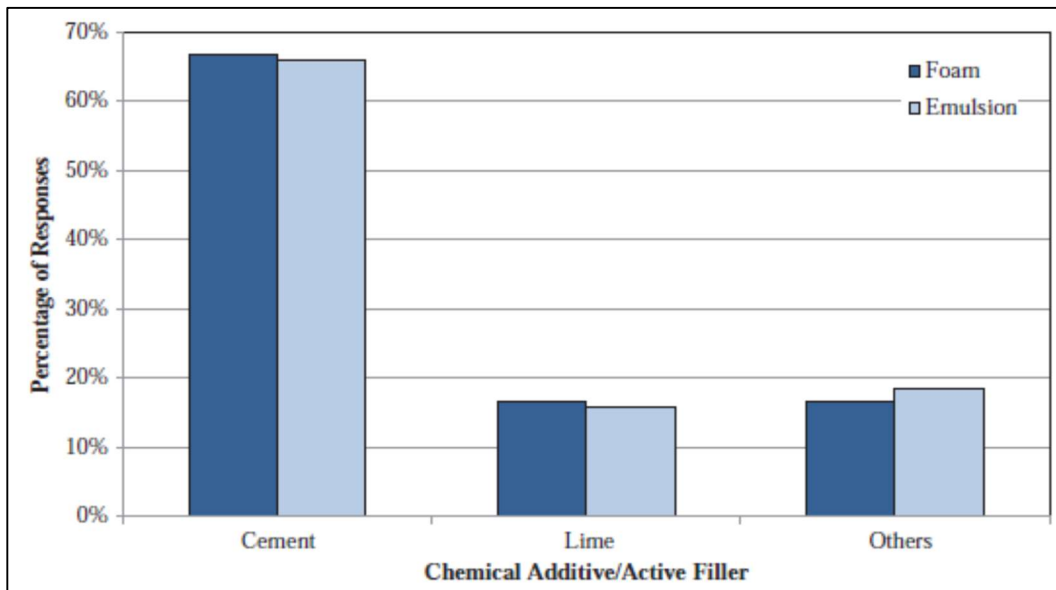
Em se tratando dos principais fíleres ativos utilizados, a figura 6 traz os resultados obtidos pelo estudo da NCHRP (2021) considerando a reciclagem do tipo FDR. É possível destacar que o cimento (*cement*) aparece em primeiro lugar, sendo o fíler ativo mais utilizado, independentemente de ter sido empregado como agente estabilizante a espuma (*foam*) ou a emulsão (*emulsion*). Em segundo lugar, em um patamar bem mais reduzido, é utilizada a cal (*lime*).

Figura 5 - Ligantes asfálticos mais empregados na reciclagem de pavimentos na América do Norte (EUA e Canadá).



Fonte: NCHRP, 2021.

Figura 6 - Fíleres ativos mais empregados na reciclagem do tipo FDR na América do Norte (EUA e Canadá).



Fonte: NCHRP, 2021.

Apresentados os agentes estabilizantes e fíleres ativos utilizados na reciclagem de pavimentos, o próximo item aborda os principais conceitos envolvidos na reciclagem do tipo FDR com emprego de ligantes asfálticos.

2.3 RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Este tópico destaca os principais conceitos envolvidos na reciclagem do tipo FDR com adição de ligantes asfálticos. O processo executivo da técnica é relatado, além de diversas experiências práticas de rodovias que foram restauradas ou reabilitadas, a nível nacional e internacional, com esse tipo de solução. Por fim, é apresentado um panorama atual e alguns trabalhos recentes que vêm sendo desenvolvidos nessa área de estudo.

2.3.1 Conceituação e aspectos gerais

Segundo a *Portland Cement Association* (PCA, 2017), a reciclagem do tipo FDR é um método de reabilitação que envolve a reciclagem de um pavimento asfáltico existente e sua camada inferior, transformando essa mistura em uma nova camada de base. Ainda de acordo com os autores, o processo de reciclagem FDR é iniciado com o emprego de uma máquina recicladora, equipamento que realiza a trituração e quebra do revestimento asfáltico e de uma parcela da camada de base, sub-base ou subleito. O material triturado é uniformemente misturado com um agente estabilizante, como a emulsão asfáltica, objetivando a obtenção de um material homogêneo com melhores propriedades mecânicas. Passada a etapa de trituração e mistura, o material estabilizado é compactado com o emprego de rolos e, como resultado, é obtida uma camada de base pronta para receber a aplicação de uma camada de revestimento.

SABITA (2020) destaca que o comportamento dos BSMs é bastante semelhante ao de materiais granulares não cimentados, porém com níveis significativamente maiores de coesão e reduzida sensibilidade à umidade. Os autores relatam que as partículas maiores dos agregados não são totalmente revestidas pelo ligante, sendo que ela acaba se dispersando e revestindo completamente apenas as partículas mais finas, resultando na formação de um mastique rico em ligante asfáltico entre as frações mais grossas.

Normalmente, pequenas quantidades de filer ativo, como cimento ou cal hidratada, são adicionados à mistura em conjunto com a emulsão ou espuma de asfalto. A presença do filer ativo acaba por auxiliar o processo de dispersão do ligante. A hidratação do cimento ou da cal reduz o teor de umidade na mistura e ajuda a resistir à desagregação precoce causada pela ação do tráfego. Também pode ser observado um ganho de resistência gradual ocasionado pelas forças de ligação existentes entre o ligante e os agregados, efeito esse que é aprimorado pela

presença do filer ativo, proporcionando uma resistência de longo prazo aos danos provocados pela umidade (SABITA, 2020).

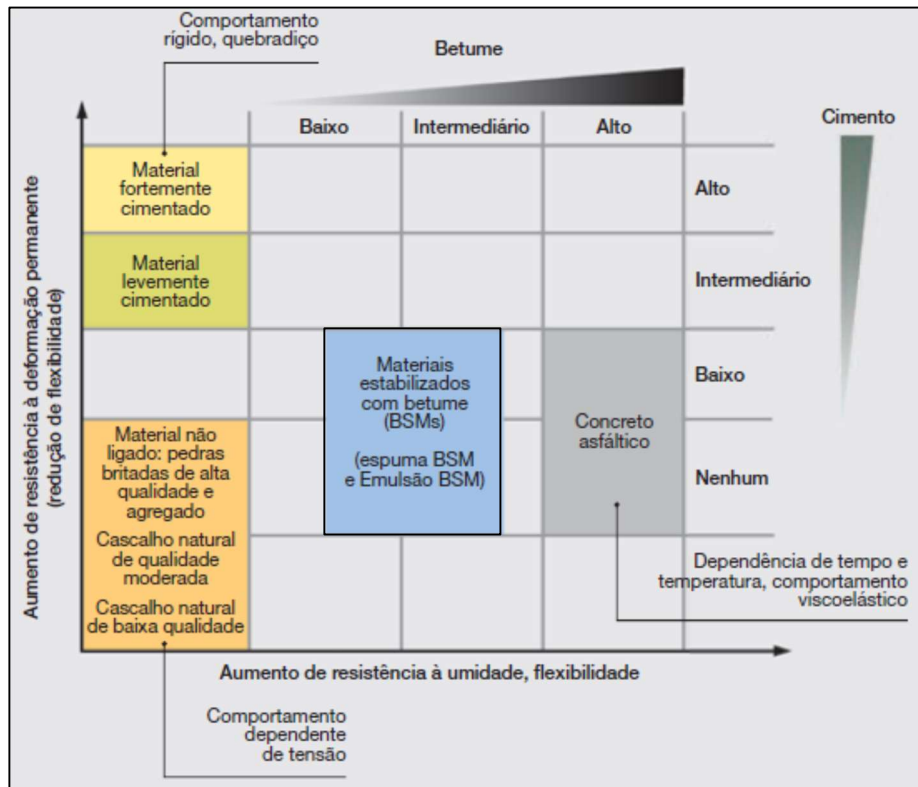
O documento da SABITA (2020) expõe ainda as principais características envolvidas no comportamento dos BSMs, as quais são destacadas a seguir:

- a) Os BSMs obtêm um aumento significativo na coesão quando comparados aos materiais não tratados. O ângulo de atrito interno dos BSMs é bastante semelhante ao do material não tratado;
- b) Os BSMs adquirem resistência à flexão e uma certa rigidez como resultado das propriedades viscoelásticas do ligante disperso na mistura. Todavia, as partículas maiores não são revestidas pela película de ligante de forma contínua, não ficando totalmente “ligadas”. Dessa forma, os BSMs retêm as características granulares do material original, sendo sua rigidez dependente do estado de tensões e não estando propensos ao trincamento por fadiga;
- c) O ligante asfáltico fica disperso, principalmente, no entorno das partículas menores, o que acaba por encapsular e imobilizar as mesmas. Isso promove uma redução na susceptibilidade à umidade, melhorando a durabilidade dos BSMs. Uma vez que os finos estão “colados”, a tendência dos BSMs de bombear finos ao ser solicitado pelas cargas do tráfego é significativamente reduzida;
- d) De forma semelhante aos materiais granulares não tratados, a rigidez dos BSMs em uma camada de pavimento depende de alguns fatores como: a qualidade inerente do material não tratado; a densidade atingida pelo material; os teores de ligante e filer ativo adicionados e sua dispersão na mistura; o clima local (principalmente a temperatura e a precipitação) e a rigidez da camada subjacente. Importante destacar que o elevado aumento na coesão bem como a pequena variação no ângulo de atrito interno do BSM são os fatores responsáveis por permitir que o mesmo seja capaz de sustentar um maior nível de rigidez quando uma carga é aplicada;
- e) O principal mecanismo de falha dos BSMs é a deformação permanente;
- f) O comportamento dos BSMs pode variar consideravelmente e depende da qualidade do material não tratado bem como das quantidades de ligante e filer ativo aplicadas. Quando cimento em excesso é adicionado, a mistura pode acabar se comportando como um material tratado com cimento, sendo que o benefício da adição do ligante passe a ser discutível. Por esta razão, a adição de cimento deve ser limitada a 1% (em massa). Adicionalmente, existindo a presença de sílica no material não tratado, o potencial para reação pozolânica com o filer ativo precisa ser examinado.

Cabe destacar que um BSM apresenta um teor de vazios semelhante ao de uma camada granular e não ao de uma mistura asfáltica. Dessa maneira, eles são granulares por natureza, sendo tratados como tal durante sua construção em campo (SABITA, 2020). O comportamento dos BSMs – *Bitumen Stabilized Materials* – com relação aos demais materiais utilizados na

estrutura de pavimentos é ilustrado na figura 7. Feita a apresentação do conceito da técnica FDR e das principais características envolvidas no comportamento dos BSMs, será abordado no próximo item seu processo executivo.

Figura 7 - Comportamento dos materiais utilizados na construção de pavimentos.



Fonte: WIRTGEN, 2012.

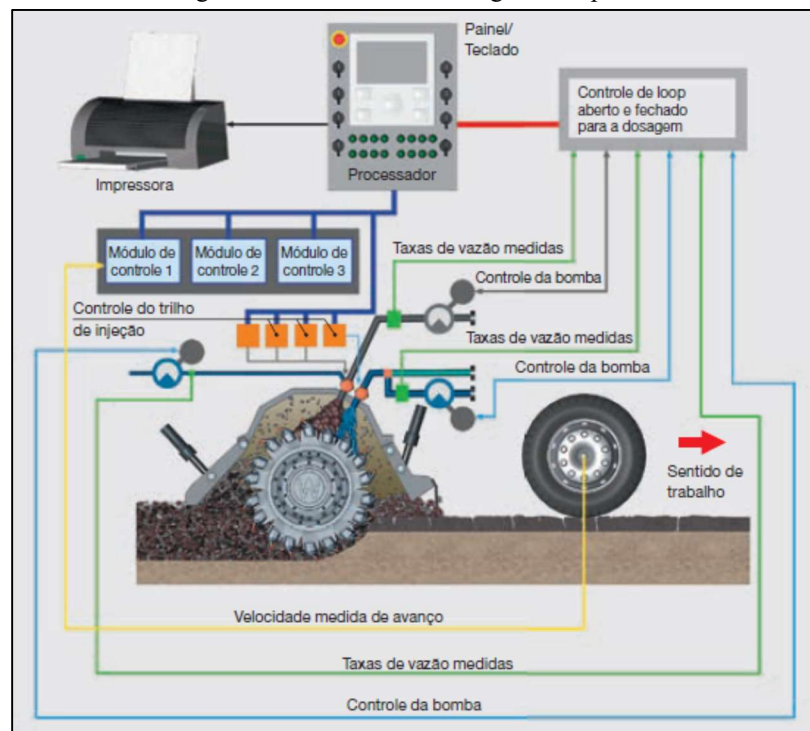
2.3.2 Processo executivo

A reciclagem do tipo FDR é realizada com o uso de máquinas recicladoras. O cilindro de corte pode ser considerado o ponto principal de todas as recicladoras, o qual realiza uma rotação no sentido anti-horário e, enquanto o equipamento avança, o material existente na profundidade de corte é pulverizado, sendo suspenso até a câmara de mistura que envolve o cilindro. As taxas de aplicação dos fluidos são dosadas de forma precisa por meio de um microprocessador, responsável por regular a vazão de acordo com o volume de material existente na câmara de mistura. A injeção dos líquidos é feita por meio de uma série de bicos espaçados de forma equidistante distribuídos em uma barra de aspersão, a qual se estende por toda a largura da câmara de mistura. Vale destacar que os microprocessadores são de suma importância, pois são

os responsáveis por controlar as taxas de aplicação (WIRTGEN, 2012). A figura 8 ilustra, esquematicamente, o processo envolvido na reciclagem do tipo FDR.

Caminhões-tanque são conectados à recicladora. Independentemente do tipo de ligante asfáltico aplicado, o tubo de alimentação deve possuir diâmetro mínimo de 10 cm e o seu comprimento deve ser minimizado (SABITA, 2020). Os autores ainda destacam que a velocidade de avanço da recicladora é um parâmetro crítico, influenciando diretamente a granulometria da mistura e, conseqüentemente, sua qualidade e desempenho. O estudo também cita que, ao iniciar a operação de reciclagem, a recicladora deverá acelerar rapidamente até atingir a velocidade de 8 metros por minuto, minimizando assim a distância percorrida durante a etapa de aceleração pois, nesse momento, a pressão na barra de aspersão ainda se encontra abaixo da ideal.

Figura 8 - Processo da reciclagem do tipo FDR.



Fonte: WIRTGEN, 2012.

Caso haja a adição de fileres ativos, eles poderão ser espalhados previamente na via existente. Outra possibilidade é misturar o filer ativo com a água, formando uma “lama” que pode ser injetada diretamente na câmara de mistura. Nesse caso, deverá ser acoplada à recicladora uma unidade adicional capaz de mesclar os materiais, a qual será disposta imediatamente à frente da

recicladora, deslocando o caminhão-tanque com ligante asfáltico para o começo, caracterizando-o como o primeiro veículo do “trem de reciclagem” (WIRTGEN, 2012).

A fim de reduzir a viscosidade e facilitar o bombeamento, a emulsão asfáltica deverá ser aquecida a uma temperatura de 60°C. Esse aquecimento deve ser feito seguindo as orientações do fabricante, sendo necessária a circulação da emulsão dentro do tanque de armazenamento até que a temperatura almejada seja alcançada. Caso esse ponto não seja observado, poderá ocorrer a ruptura prematura da emulsão, comprometendo sua qualidade (SABITA, 2020).

Logo após a passagem da recicladora, a camada deve ser compactada até que um grau de compactação mínimo de 95% seja atingido. A tolerância para o teor de umidade da mistura em campo é de +/- 2% da umidade ótima. O equipamento utilizado na compactação inicial não deve ficar distante mais de 150 m da recicladora. A vibração do cilindro deverá ser configurada para uma elevada amplitude e baixa frequência (ARRA, 2017). O estudo da SABITA (2020) destaca que para promover uma compactação eficaz capaz de atingir o fundo da camada reciclada, a velocidade de operação do rolo primário deve ser restrita a, no máximo, 3 km/h.

Concluída a etapa inicial de compactação, quaisquer reentrâncias remanescentes das “patas” do cilindro deverão ser removidas pela motoniveladora e possíveis ajustes na seção transversal serão executadas nesse momento. Após a passagem da motoniveladora, deve ser iniciada a segunda etapa de compactação, com emprego de rolos vibratórios com cilindro único ou tandem (duplo) com superfície lisa. A etapa final da compactação é realizada com a passagem de um rolo de pneus. Importante destacar que, nessa fase final de acabamento, a compactação não deve ser realizada no modo vibratório, podendo ser aplicado um leve jato de água para auxiliar, obtendo uma aparência final satisfatória para camada reciclada (ARRA, 2017).

O rolo de pneus deve ser operado a uma velocidade entre 10 e 20 km/h, trabalhando em passagens paralelas por toda largura reciclada da pista. No caso de haver liberação ao tráfego antes de ser executada a camada final de revestimento, poderá ser aplicada uma emulsão asfáltica bastante diluída, a fim de fornecer uma proteção adicional contra a degradação prematura da superfície (SABITA, 2020). A figura 9 apresenta uma visão geral da execução de uma reciclagem do tipo FDR com adição de ligante asfáltico.

Após a apresentação do processo executivo da reciclagem FDR com adição de ligantes asfálticos, o próximo item destaca o histórico de aplicação e o panorama atual dessa técnica, em nível nacional e internacional.

Figura 9 - Equipamentos executando uma FDR com adição de emulsão asfáltica.



Fonte: SABITA, 2020.

2.3.3 Histórico de aplicação e panorama atual

Este tópico relata o histórico de aplicação e o panorama atual, nos cenários nacional e internacional, da técnica FDR com adição de emulsão asfáltica.

2.3.3.1 Cenário nacional

Foi realizada uma consulta informal junto à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) acerca da aplicação da técnica FDR com adição de emulsão asfáltica. Nessa ocasião, foi informado ao autor que, até o momento, não foi executada nenhuma obra contemplando esse tipo de solução no RS. Por outro lado, surgiu a informação de que tal técnica já foi aplicada na rodovia BR-116/SC, em um trecho compreendido entre os municípios de Lages e Mafra. Não foram obtidas maiores informações desse projeto.

Também foram sondadas algumas empresas fornecedoras de ligantes e aditivos químicos para indústria rodoviária a fim de obter alguns casos de obra. Nesse questionamento, surgiu a informação de que está prevista a execução de uma reciclagem do tipo FDR com incorporação de emulsão na BR-282, próxima a cidade de Chapecó/SC. O projeto contempla a reciclagem de

aproximadamente 20.000 (vinte mil) m³ de material, em uma extensão de 15 km. Esse mesmo fornecedor relatou uma obra executada no Rodoanel Metropolitano de São Paulo (SP-021) – Trecho Leste, entre o km 87,3 e o km 96, no ano de 2021. A profundidade de reciclagem adotada foi de 30 cm, sendo a estrutura do pavimento composta por CBUQ e BGS, ambos com espessura variável. Foram incorporados 1% de cal e 3% de emulsão na mistura reciclada.

Em nível nacional, a técnica FDR com incorporação de emulsão asfáltica parece não estar muito difundida, não sendo encontrados casos de obra documentados. Ao que parece, ainda é dada preferência para incorporação da espuma de asfalto como agente estabilizante. Considerando a aplicação desse tipo de ligante, cabe destacar os trabalhos de Castro (2003), Guatimosim *et al.* (2017), Guatimosim *et al.* (2019), dentre outros.

Do ponto de vista prático, a reciclagem com emulsão, um produto inteiramente industrializado, pode ser considerado um processo mais confiável quando comparado com a espuma, cuja formação ocorre no momento da execução, estando esse produto sujeito a variações. Outro ponto que merece destaque é quanto aos sistemas de injeção. Em havendo algum problema nas máquinas recicladoras configuradas para incorporação da espuma, é mais difícil a sua manutenção, devido à falta de mão de obra, fazendo com que seja enviada uma equipe especializada, geralmente do país de origem da recicladora, para execução de tal reparo. Já nas máquinas configuradas para adição de emulsão, esse conserto é mais fácil e rápido, podendo ser realizado por prestadores de serviço nacionais.

2.3.3.2 Cenário internacional

Diefenderfer e Apeageyi (2011) analisaram segmentos reabilitados, no ano de 2008, com a técnica FDR na rodovia SR-40, no estado da Virgínia/EUA. Dentre os trechos avaliados, dois utilizaram como agentes estabilizantes espuma ou emulsão. Os autores destacam que a estrutura do pavimento possuía um revestimento asfáltico com espessura variável entre 12,5 e 15 cm, sendo a camada de base composta por agregados britados e não britados, com espessura entre 15 e 25 cm. O pavimento foi reciclado até uma profundidade entre 20 e 25 cm, sendo executado sobre a camada reciclada um CBUQ com aproximadamente 4 cm. A operação de reciclagem foi feita em duas etapas, sendo a primeira passagem da máquina responsável pela trituração do material e, a segunda, pela adição dos agentes estabilizantes.

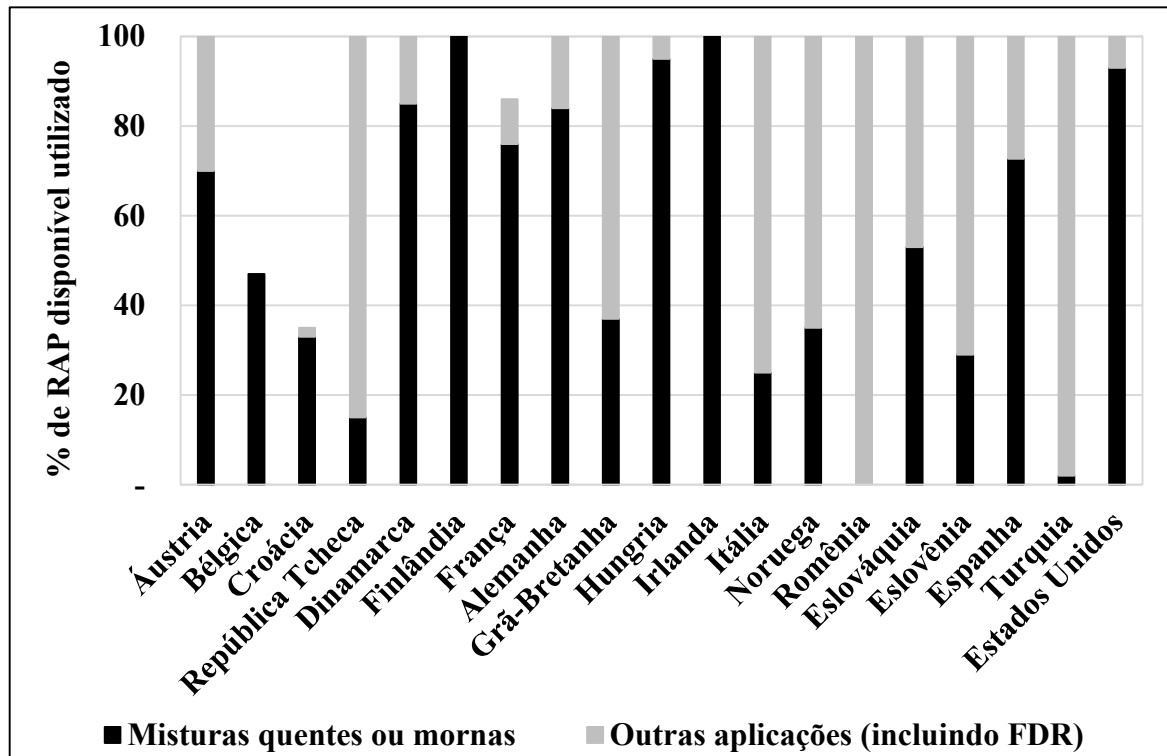
Nunes (2008) buscou documentar a experiência portuguesa na reciclagem a frio “*in situ*” de pavimentos flexíveis com o uso de emulsões asfálticas. De acordo com a autora, a primeira obra realizada em Portugal com a técnica FDR em que a camada reciclada possuía predominantemente materiais granulares data de 1998, haja vista que as experiências anteriores, iniciadas em 1993, envolviam fundamentalmente a reciclagem de camadas asfálticas. Nesse projeto, a profundidade de reciclagem foi de 12 cm, sendo adicionados à camada reciclada pó de pedra e cal, após estudos iniciais verificarem a necessidade de correção da granulometria e plasticidade dos finos. A formulação da mistura reciclada resultou nos seguintes teores de adição: 10% de pó de pedra, 5% de emulsão e 1% a 2% de cal. O projeto foi executado na rodovia EN 260 (Serpa/Vila Verde de Ficalho), em uma extensão de 17,8 km.

Bocci *et al.* (2014) publicaram um estudo de caso relatando a aplicação da técnica FDR em uma estrada rural localizada na Itália, denominada SP18. O pavimento original era composto por 8 cm de CBUQ e 30 cm de base granular. A estrutura obtida após o dimensionamento M-E resultou em 8 cm de CBUQ, 15 cm de base estabilizada tratada com cimento e emulsão (*Cement Bitumen Treated Material*) e 18 cm de base granular. Cabe destacar que a camada reciclada era composta por 20% de RAP e 80% de base granular, sendo que a estrutura reabilitada sofreu uma elevação de 3 cm quando comparado ao nível do pavimento original.

Segundo a *National Asphalt Pavement Association* (NAPA, 2020), os produtores de misturas asfálticas nos EUA continuam sendo os recicladores mais ativos do país, pois mais de 94% do RAP gerado na indústria rodoviária é reutilizado na construção de novos pavimentos. Os outros 6% são utilizados em outras áreas da engenharia civil fazendo com que, atualmente, 100% do RAP gerado nos EUA seja reaproveitado. Os autores também citam que se estima que o uso de RAP durante o ano de 2019 tenha economizado 4,5 milhões de toneladas de ligante asfáltico e mais 84 milhões de toneladas de agregados virgens. Em termos financeiros, isso equivale ao valor de US\$ 3,2 bilhões.

A *European Asphalt Pavement Association* (EAPA) publica anualmente, desde 2013, uma coletânea chamada “*Asphalt in Figures*”. Nestes relatórios, é possível encontrar informações sobre a produção, aplicação e uso de ligantes asfálticos em toda a Europa. De acordo com os dados disponíveis no último levantamento (EAPA, 2020), foi elaborado o gráfico apresentado na figura 10, que apresenta um panorama atual sobre a reutilização e reciclagem de RAP no ano de 2020 no continente europeu.

Figura 10 - Reaproveitamento de RAP no continente europeu no ano de 2020.



Fonte: elaborado pelo autor.

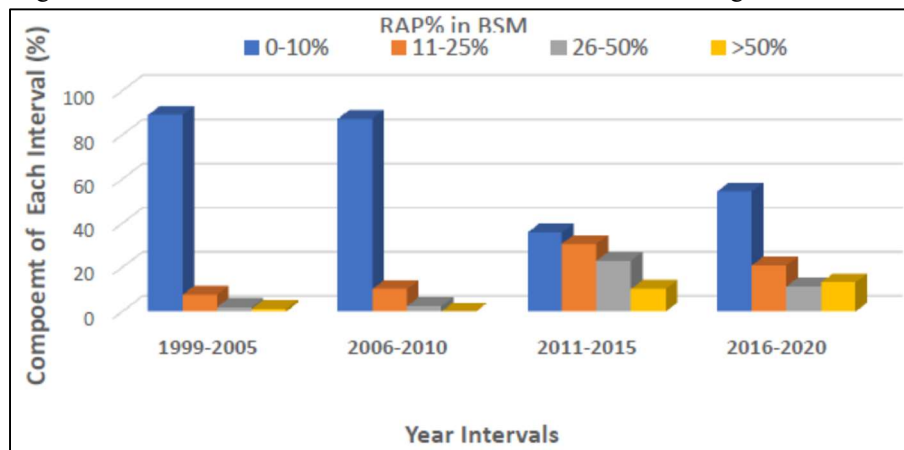
A partir da figura 10, algumas considerações podem ser feitas:

- Entre todos os países, apenas Bélgica, Croácia e França não reciclam, reutilizam ou estocam de forma temporária e controlada o montante total de RAP gerado em seu território. Vale destacar que os estoques temporários buscam armazenar o RAP de maneira adequada para posterior reaproveitamento;
- Na maioria dos países, o principal destino do RAP é a produção de misturas asfálticas a quente ou mornas;
- A Romênia aplica 100% do RAP em processos de reciclagem a frio “*in situ*”. Já a Turquia emprega 98% do RAP na construção de camadas granulares;
- Finlândia e Irlanda são os únicos países a reutilizarem 100% do RAP na produção de misturas asfálticas a quente ou mornas;
- De uma maneira geral, todos os países europeus buscam reaproveitar o RAP gerado em seus territórios. Isso mostra que esse material é considerado um agregado bastante nobre, podendo ser utilizado nas mais diversas aplicações.

O estudo de Jenkins *et al.* (2021) fornece informações sobre a evolução histórica do conteúdo de RAP nas camadas de base recicladas a frio. Os autores compilaram dados de 620 projetos desenvolvidos ao longo de 21 anos, sendo possível visualizar a existência de um crescimento sistemático no teor de RAP das misturas recicladas, ou seja, a predominância de materiais com

comportamento puramente granular vem reduzindo significativamente. A figura 11 ilustra a evolução temporal dos teores de RAP presentes nas misturas recicladas a frio. Concluída a apresentação de alguns casos de aplicação da técnica FDR com incorporação ligantes asfálticos e do panorama atual, nos cenários nacional e internacional, serão abordadas no próximo item algumas pesquisas recentes realizadas nessa área de estudo.

Figura 11 - Percentual de RAP em misturas recicladas a frio com ligantes asfálticos.



Fonte: Jenkins *et al.* (2021).

2.4 PESQUISAS RECENTES SOBRE RECICLAGEM COM LIGANTES ASFÁLTICOS

Neste tópico serão apresentados alguns trabalhos julgados pertinentes para uma melhor compreensão do tema do presente trabalho. Muitas das pesquisas referidas foram conhecidas e selecionadas mediante o emprego da técnica chamada revisão sistemática de literatura. Vale destacar que foi utilizado como critério de seleção um íterim de 10 anos, ou seja, serão citadas publicações feitas a partir do ano de 2013.

Tanski (2016) avaliou o comportamento mecânico de materiais reciclados a frio com incorporação de emulsão asfáltica do tipo RL-1C e cimento. As misturas eram compostas por 70% de RAP e 30% de agregados virgens. Os teores de emulsão adicionados foram de 2%, 3%, 4% e 5%, sendo o cimento acrescentado em conteúdo de 0% e 1%. Todas as misturas foram analisadas mediante a realização dos seguintes ensaios: resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração na compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), ensaio de módulo complexo (E^*), *Flow Number* (FN) e índice de suporte Califórnia (ISC). O autor

destaca que, de uma maneira geral, quanto maiores os teores de emulsão empregados maiores os valores de umidade ótima obtidos nas curvas de compactação. Referente aos pesos específicos, os valores variaram entre 1,975 g/cm³ e 2,036 g/cm³ (Proctor - Energia Modificada). Os valores de RT obtidos ficaram entre 40 kPa e 190 kPa, sendo que as misturas com adição de 1% de cimento apresentaram valores superiores àquelas sem cimento. Ainda, o aumento no teor de emulsão ocasionou uma tendência de queda nos resultados de RT.

Andrade (2017) se propôs a avaliar o desempenho de quatro segmentos experimentais construídos na Rodovia Fernão Dias (BR-381), responsável pela ligação entre os municípios de São Paulo e Belo Horizonte. As estruturas dos pavimentos estudados foram: pavimento flexível executado com base de BGS, pavimento semirrígido executado com base de BGTC e dois pavimentos com bases asfálticas compostas por RAP, sendo uma das bases estabilizada com emulsão asfáltica e outra com espuma de asfalto. No caso da base composta por RAP + emulsão foram adicionados 2% de cimento e 3% de emulsão. Para mistura constituída por RAP + espuma também foi incorporado 2% de cimento, sendo a espuma acrescida no teor de 3%. Para obtenção da espuma, foi utilizado um CAP 85/100.

O autor cita que a caracterização mecânica das misturas foi feita mediante a realização de ensaios triaxiais de MR, de acordo com o preconizado pela normativa DNIT ME 134/2010. Os corpos de prova foram moldados nas dimensões 10x20cm, com emprego da compactação Proctor - energia modificada. As amostras foram submetidas a um processo de cura controlada, sendo deixadas 3 dias em estufa à 60°C e, após esse intervalo, colocadas em sacos plásticos vedados por um período de 4 dias para estabilizar e homogeneizar a umidade remanescente. Foi possível observar que a resposta da mistura RAP + emulsão independe da σ_3 aplicada, evidenciando que não se trata de um material com comportamento granular. Os corpos de prova da mistura RAP + espuma também não apresentaram variação em função da σ_3 , corroborando a ideia de que ambos os materiais não se comportam como granulares (ANDRADE, 2017).

Kuchiishi (2019) avaliou a influência da temperatura, da frequência de carregamento, do estado de tensões e da umidade na rigidez de misturas recicladas a frio estabilizadas com emulsão e espuma de asfalto. De acordo com o autor, apesar das vantagens econômicas e ambientais dessas misturas, seu comportamento mecânico é complexo, sendo afetado por diversas variáveis. Para analisar o efeito da temperatura e da frequência de carregamento foi realizado o ensaio de módulo dinâmico. A influência da umidade e do estado de tensões foi verificada com

a realização de ensaios triaxiais de MR, sendo os corpos de prova submetidos a diferentes condições de cura. O autor também verificou, mediante ensaios de papel filtro e microtomografia por raio X, que a sucção mátrica influencia o MR das misturas.

Para realização do ensaio triaxial de MR, Kuchiishi (2019) aplicou a norma DNIT ME 134/2010. Foram moldados corpos de prova com dimensões 10x20cm, sendo empregada a compactação vibratória. De acordo com o autor, as misturas com 2% de cimento apresentaram um comportamento bem mais rígido quando comparadas àquelas com 1% de cal hidratada. Enquanto as primeiras obtiveram módulos de aproximadamente 2000 MPa, as últimas alcançaram valores inferiores a 1000 MPa. O pesquisador também destaca o comportamento dos materiais em função das σ_3 aplicadas. No caso das misturas sem adição de cimento, é possível observar um aumento do MR para as maiores σ_3 , comportamento similar ao de materiais granulares. Por outro lado, as misturas com 2% de cimento não apresentaram relação entre o MR e as σ_3 aplicadas, assemelhando-se, dessa maneira, aos materiais cimentados.

A fim de avaliar a influência da umidade no comportamento mecânico das misturas, Kuchiishi (2019) realizou ensaios triaxiais de MR para quatro condições de cura distintas:

- a) Condição 0: umidade ótima, logo após a compactação;
- b) Condição F1: sete dias em estufa a 40°C;
- c) Condição I (imersão): concluída a condição F1 (7 dias a 40°C), imersão por 24 horas em água destilada a 20°C;
- d) Condição F2: concluída a imersão (condição I), cura adicional em estufa por mais sete dias a 40°C.

Os resultados obtidos pelo autor destacam que o processo de cura afetou consideravelmente os valores de MR, sendo que para a condição 0 (umidade ótima) foram obtidos os menores resultados. A cura controlada em estufa (condição F1) promoveu um aumento significativo na rigidez dos materiais, haja vista que os valores dos módulos quase triplicaram quando comparados aos valores iniciais. A imersão das amostras (condição I) resultou em uma queda nos valores e, vencido o período de cura adicional (condição F2), os resultados voltaram a subir, porém não alcançaram os patamares iniciais. Vale destacar que ambas as misturas apresentaram um comportamento dependente da σ_3 aplicada, típico de materiais granulares.

Kuchiishi (2019) também realizou o monitoramento da sucção, utilizando o método do papel filtro, nos corpos de prova submetidos às diferentes condições de cura. A sucção foi medida em

quatro momentos distintos (condição 0, F1, I e F2). Com relação aos resultados obtidos nessa etapa da pesquisa, o autor destaca os seguintes pontos principais:

- a) Foi observada uma relação direta entre o MR e a sucção matricial. O acréscimo do MR está associado ao acréscimo da sucção matricial;
- b) Na medida em que ocorre uma redução nos teores de umidade, os valores da sucção matricial aumentam afetando, dessa maneira, a rigidez das misturas;
- c) Especial atenção deve ser dada para que ocorra uma cura apropriada em campo da camada reciclada antes da execução do revestimento superficial. Caso não seja assegurada uma redução adequada da umidade após a compactação, a evolução da rigidez pode ser prejudicada. Essa situação pode fazer com que o pavimento reabilitado prontamente aberto ao tráfego não seja capaz de suportar de forma satisfatória as cargas aplicadas;
- d) A mistura com predominância de brita graduada simples apresentou as maiores sucções. Já para as misturas compostas principalmente por RAP, as medidas de sucção foram ligeiramente menores.

Silva (2019) avaliou o comportamento frente à deformação permanente de quatro misturas a frio estabilizadas com emulsão asfáltica e espuma de asfalto. Os corpos de prova, com dimensões 10x15cm, foram compactados em duas camadas pelo método vibratório. As amostras foram deixadas em estufa durante 28 dias à 40°C, garantindo assim a não influência do tempo de hidratação do cimento nos resultados. Também foram ensaiadas amostras sem cura, sendo as mesmas submetidas ao experimento logo após a compactação. O autor realizou ensaios de *Flow Number* empregando três metodologias distintas. Inicialmente, foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 16505, sendo aplicada uma tensão axial de 204 kPa a uma temperatura de 60°C. Em um segundo momento, foram aplicadas as orientações propostas por Kim e Lee (2012), que consiste na aplicação de uma tensão axial de 140 kPa a uma temperatura de 40°C. Por fim, mediante a análise de tensões realizada com o software 3D-MOVE, executaram-se ensaios de *Flow Number* com as tensões verticais e temperaturas similares àquelas encontradas nos trechos experimentais monitorados pelo estudo. As principais conclusões obtidas por Silva (2019) podem ser resumidas da seguinte maneira:

- a) As misturas recicladas a frio estabilizadas com ligante asfáltico possuem um comportamento complexo, sendo que a deformação permanente foi afetada pela tensão vertical, temperatura, frequência de sollicitação, umidade, granulometria e processo de cura;
- b) A cura das amostras pode ser citada como o principal aspecto avaliado, haja vista ter proporcionado uma melhor resposta quanto à deformação permanente;

- c) O teor de RAP amplia a susceptibilidade à deformação permanente, pois a mistura que apresentou as maiores deformações plásticas foi aquela com maior percentual de RAP em sua composição (RAP_3E2C);
- d) A incorporação de agregados virgens e filer ativo (cimento ou cal) torna as misturas mais resistentes às deformações plásticas, principalmente para maiores períodos de cura, tornando o esqueleto mineral mais resistente.

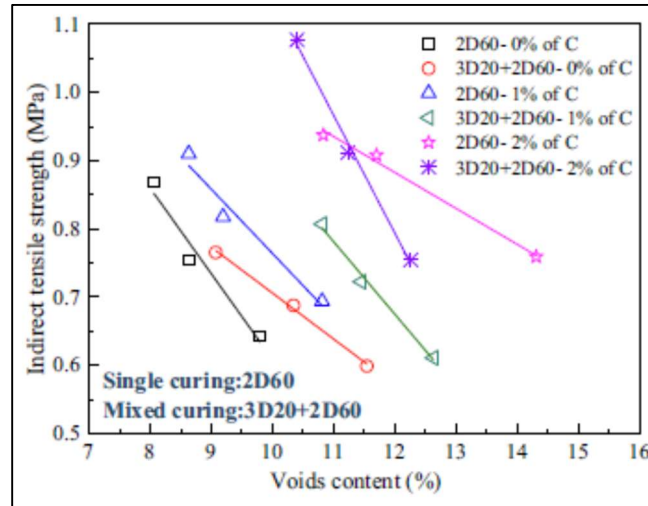
Yang *et al.* (2021) avaliaram o efeito da cura e da compactação nas propriedades mecânicas e volumétricas de uma mistura reciclada a frio com emulsão asfáltica sob diferentes teores de cimento. As misturas foram submetidas a duas condições de cura, denominadas de cura simples e mista. No caso da primeira, logo após a compactação, as amostras foram colocadas em uma estufa à 60°C por um prazo de dois dias e, no caso da segunda, os corpos de prova eram deixados em uma câmara com temperatura de 20°C por um período de três dias. Passado esse intervalo, deslocavam-se as amostras para uma estufa à 60°C, local onde permaneciam por mais dois dias.

Quanto aos métodos de compactação, os autores empregaram a metodologia Marshall, porém com algumas adaptações. As denominadas compactações simples foram feitas aplicando-se 50 e 75 golpes em cada uma das faces dos corpos de prova. A chamada compactação dupla foi feita da seguinte maneira: em um primeiro momento, foram aplicados 50 golpes em cada face, sendo as amostras submetidas aos processos de cura controlada e, após serem removidos da estufa, eram aplicados 25 golpes adicionais. A composição da mistura estudada consistia em 70% de RAP e 30% de agregados virgens de calcário. Os teores de cimento aplicados foram 0%, 1% e 2%. A emulsão asfáltica catiônica utilizada era do tipo RL, adicionada no teor de 4%. A figura 12 ilustra as relações obtidas entre o índice de vazios e a resistência à tração indireta para as diferentes misturas estudadas por Yang *et al.* (2021). As principais conclusões desse estudo estão resumidas abaixo:

- a) Para baixos teores de cimento (até 1%), a cura simples promove uma maior redução no índice de vazios, aumentando os valores de RT. Todavia, para teores de cimento mais elevados (2% nesse caso), a cura mista parece ser mais indicada. Isso pode ser explicado pelo fato de que a cura simples (maiores temperaturas iniciais) beneficia a ruptura da emulsão e a formação da película de ligante, sendo mais prejudicial para hidratação do cimento;
- b) Recomenda-se empregar o processo de cura mista para teores de cimento a partir de 2%, haja vista que as temperaturas iniciais mais baixas (20°C) favorecem o processo de hidratação, promovendo as reações físico-químicas;
- c) O aumento no número de golpes promove uma redução no índice de vazios, elevando os valores de RT. A compactação dupla se mostrou a mais eficaz pois, a medida em que ocorre a evaporação da água no processo de cura, os 25 golpes

adicionais conseguem reduzir ainda mais os vazios deixados pela água. Considerando essa melhoria promovida nas propriedades mecânicas da mistura, recomenda-se empregar a compactação dupla para moldagens em laboratório.

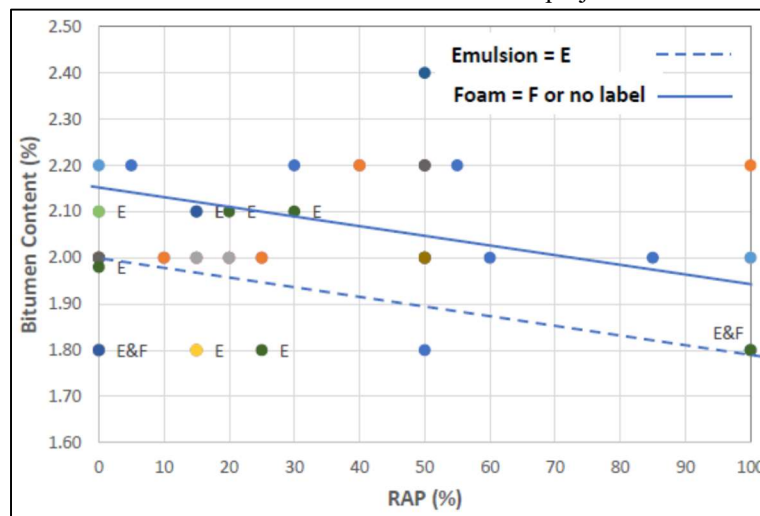
Figura 12 - Relação entre o índice de vazios e a resistência à tração indireta.



Fonte: Yang *et al.* (2021).

Jenkins *et al.* (2021) apresentaram uma relação entre o conteúdo de RAP e o teor de projeto de misturas recicladas a frio estabilizadas com espuma de asfalto e emulsão. Esse comportamento está ilustrado na figura 13, sendo possível fazer duas colocações: o aumento no teor de RAP promove uma queda nos teores de projeto; os teores de projeto encontrados para misturas estabilizadas com emulsão são inferiores aos obtidos para misturas recicladas com espuma.

Figura 13 - Influência do conteúdo de RAP no teor de projeto de misturas BSM.



Fonte: Jenkins *et al.* (2021).

Meneses (2022) avaliou a influência de diferentes metodologias de compactação (Proctor, Marshall, giratório e vibratório) nas propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio. Foram avaliados o teor de vazios ($e\%$) e o comportamento viscoelástico das misturas, constituídas por 85% de RAP e 15% de agregados virgens. Como filer ativo, foi adicionado 1% de cimento do tipo CPIII-40 e, como agente estabilizante, 4% de emulsão catiônica do tipo RL. As principais considerações feitas pelo autor podem ser resumidas da seguinte maneira:

- a) Os corpos de prova compactados pela metodologia Proctor obtiveram os menores $e\%$, enquanto a compactação vibratória apresentou os maiores $e\%$. As compactações Marshall e giratória apresentaram valores intermediários;
- b) A compactação giratória é a mais fácil de ser aplicada, considerando aspectos exclusivamente operacionais, tendo apresentado os menores coeficientes de variação para os $e\%$, reduzindo a dispersão dos dados e facilitando as análises;
- c) A metodologia Proctor deve ser evitada, devido a uma possível quebra de agregados. O método Marshall resultou nas maiores dispersões para o $e\%$;
- d) Os corpos de prova moldados pelos métodos Proctor e giratório demonstraram propriedades viscoelásticas semelhantes, sendo que a compactação vibratória apresentou comportamento distinto. Vale lembrar que os corpos de prova Marshall não foram avaliados do ponto de vista viscoelástico;
- e) Em se tratando da rigidez, a compactação Proctor alcançou os melhores resultados (menores $e\%$), enquanto a vibratória obteve os piores (maiores $e\%$). A compactação giratória resultou em um desempenho intermediário;
- f) Referente ao ângulo de fase das misturas, aquelas moldadas no compactador giratório atingiram os maiores valores, demonstrando uma maior conexão com as propriedades do ligante asfáltico. A compactação vibratória apresentou os menores valores e a metodologia Marshall ficou em um patamar intermediário.

Orosa *et al.* (2022a) avaliaram os parâmetros de cisalhamento e a deformação permanente de misturas recicladas a frio estabilizadas com emulsão mediante a realização de ensaios triaxiais. As misturas eram compostas por 100% de RAP, tendo sido utilizada uma emulsão catiônica do tipo RL. Os corpos de prova foram moldados por um compactador giratório, nas dimensões 10x20cm, sendo garantida a obtenção do mesmo $e\%$. A cura controlada acelerada consistiu na manutenção dos corpos de prova em estufa à 50°C por 72 horas, até que fosse alcançada a constância de massa. Aquelas não submetidas ao processo de cura foram mantidas à temperatura ambiente por um período de 4 horas após a compactação, sendo ensaiadas logo depois. O teor ótimo de fluido (OFC) foi determinado através do ensaio Proctor - energia modificada, no qual obteve-se o valor de 5,75%. Considerando a granulometria idêntica das misturas (OFC constante), as únicas variáveis envolvidas foram os teores de emulsão e água

adicionados. Na tabela 1 são apresentadas as características das misturas e os parâmetros de cisalhamento obtidos. Vale destacar que as σ_3 aplicadas foram 25, 50, 100 e 200 kPa.

Tabela 1 - Características e parâmetros de cisalhamento das misturas 100% RAP estudadas por Orosa *et al.* (2022a).

Mistura	Teor de emulsão	Teor de água	Condições de cura	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
2B_3.25W. cured	2%	3.25%	72h à 50°C	365	43
2B_3.25W. uncured	2%	3.25%	4h (temp. amb.)	167	40
2.5B_2.75W. cured	2.5%	2.75%	72h à 50°C	374	31
2.5B_2.75W. uncured	2.5%	2.75%	4h (temp. amb.)	177	38
3B_2.25W. cured	3%	2.25%	72h à 50°C	427	27
3B_2.25W. uncured	3%	2.25%	4h (temp. amb.)	187	37

Fonte: elaborado pelo autor (adaptado de Orosa *et al.*, 2022a).

As principais conclusões da pesquisa de Orosa *et al.* (2022a), em termos da avaliação da resistência ao cisalhamento, podem ser resumidas da seguinte maneira:

- a) Para os corpos de prova não submetidos ao processo de cura, os parâmetros alcançados foram muito parecidos. Isso ocorreu, pois, a água disponível na mistura ainda não havia sofrido o processo de evaporação, fazendo com que o aglutinante disponível na emulsão ainda não desenvolvesse sua função coesiva;
- b) O processo de cura acelerada ocasionou um aumento generalizado nas tensões de ruptura (σ_1 , τ) para todas as σ_3 aplicadas. O maior incremento foi observado na mistura contendo 2% de ligante residual;
- c) A mistura com menor teor de emulsão alcançou o maior ângulo de atrito (ϕ), resultado do melhor intertravamento entre os grãos e da maior influência do esqueleto mineral. Esse fato revela que, para uma mesma granulometria, materiais com menores teores de emulsão tendem a ter seu comportamento mais influenciado pela σ_3 ;
- d) Os maiores valores de coesão foram obtidos pelas misturas contendo os teores de emulsão mais elevados, ao mesmo tempo que o f sofreu redução. O processo de cura acelerada pode ser considerado um ponto fundamental, haja vista o aumento considerável obtido por todas as amostras nos valores de coesão;
- e) Com relação ao ângulo de atrito (ϕ), não foi observado o mesmo comportamento. O processo de cura acelerada ocasionou o aumento do ϕ apenas na mistura com menor teor de emulsão (2% de ligante residual). Se por um lado o aumento no teor de emulsão promove uma maior coesão devido às propriedades aglutinantes do ligante, por outro lado ela atua como um

lubrificante entre o esqueleto mineral, reduzindo o atrito entre os grãos e, conseqüentemente, o ângulo de atrito.

Na figura 14 são apresentados alguns corpos de prova submetidos à ruptura nos ensaios triaxiais monotônicos executados por Orosa *et al.* (2022a). Os autores destacam que o ângulo do plano de ruptura formado foi de aproximadamente 60°.

Figura 14 - Amostras submetidas ao ensaio triaxial monotônico (ruptura à 60°).



Fonte: Orosa *et al.* (2022a).

As pesquisas citadas nessa seção não objetivaram, de forma alguma, esgotar todos os aspectos discutidos e debatidos por diversos pesquisadores ao longo dos últimos anos acerca da temática envolvida no presente trabalho. A fim de apresentar ao leitor um panorama geral e atualizado sobre o estado da arte envolvendo essa área de estudo, foi elaborada a tabela 2, na qual são resumidas as principais informações contidas em diversos artigos encontrados pelo autor na revisão sistemática de literatura realizada.

Como pode ser visto na presente revisão bibliográfica, em nível nacional dispõe-se de um “banco de dados” muito limitado sobre o comportamento mecânico, especialmente os parâmetros de resistência ao cisalhamento, de misturas compostas por RAP, brita graduada, emulsão asfáltica e cimento. Esse panorama destaca a importância dessa dissertação.

Feita a apresentação e discussão de algumas das principais pesquisas, em nível nacional e internacional, que tratam da reciclagem de materiais com incorporação de ligantes asfálticos, serão abordados no próximo item algumas metodologias existentes para dosagem de misturas recicladas com adição de emulsão asfáltica.

Tabela 2 - Resumo de alguns artigos envolvendo o estudo de misturas recicladas a frio com incorporação de emulsão asfáltica (parte 1).

Autor(es)	Propriedades avaliadas	Característica das misturas	Teores adicionados	Condições de cura	Método Compactação	Resultados obtidos
Gómez-Mejide e Pérez (2015)	Cisalhamento (c, ϕ) MR (triaxial) DP (triaxial)	100% agregados reciclados (RCD)	9, 21 e 33% (água) 5, 6, 7 e 8% (ligante residual)	Sem cura 3 dias à 50°C	Giratório	c = 219,25 kPa (sem cura) ϕ = 42,1° (sem cura) c = 388,71 kPa (3 dias à 50°C) ϕ = 43,5° (3 dias à 50°C) MR _{mínimo} = 150 MPa (sem cura) MR _{máximo} = 800 MPa (sem cura) MR _{mínimo} = 220 MPa (3 dias à 50°C) MR _{máximo} = 1300 MPa (3 dias à 50°C)
		100% agregados virgens	3, 9 e 15% (água) 2, 3, 4 e 5 % (ligante residual)	Sem cura 3 dias à 50°C		c = 257,67 kPa (sem cura) ϕ = 43,6° (sem cura) c = 370,68 kPa (3 dias à 50°C) ϕ = 45,1° (3 dias à 50°C) MR _{mínimo} = 170 MPa (sem cura) MR _{máximo} = 1050 MPa (sem cura) MR _{mínimo} = 350 MPa (3 dias à 50°C) MR _{máximo} = 1600 MPa (3 dias à 50°C)
Graziani <i>et al.</i> (2016)	Perda de umidade Resistência à tração indireta (ITS) Módulo ITS	80% RAP + 20% areia (calcário)	3,3% (emulsão) 1% e 2% (cimento)	1, 3, 7, 14, 28 e 100 dias à 25°C 1, 3, 7, 14, 28 e 100 dias à 40°C	Giratório	O aumento no teor de cimento eleva os valores das propriedades mecânicas; Maiores temperaturas de cura reduzem o tempo necessário para que uma propriedade alcance seus valores de longo prazo; A cura devido à perda de umidade está ligada ao aumento da resistência à tração indireta (ITS), enquanto a elevação do módulo ITS está vinculada à hidratação do cimento.

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Resumo de alguns artigos envolvendo o estudo de misturas recicladas a frio com incorporação de emulsão asfáltica (parte 2).

Autor(es)	Propriedades avaliadas	Característica das misturas	Teores adicionados	Condições de cura	Método Compactação	Resultados obtidos
Grilli <i>et al.</i> (2016)	Compactabilidade Parâmetros volumétricos (teor de vazios de ar - V_m , volume de vazios - VA, volume de água + emulsão - VFL)	50% RAP + 50% agregados virgens (calcário)	3% (emulsão) 2% (cimento) 4, 5, 6, 7 e 8% água	Sem cura	Giratório (molde fechado e perfurado)	A influência da água no volume de vazios (VA) pode ser definida por uma curva em formato de sino (similar ao ensaio Proctor); A compactação em molde fechado para elevados teores de água permite, inicialmente, uma compactação eficaz e, a partir da saturação, o processo de compactação passa a não permitir uma boa densificação (elevado VA). Já no molde perfurado, isso é menos evidente (drenagem); Teor ideal de água ($w_{ót.}$) alcançou a saturação ao final da compactação, gerando os menores volume de vazios (VA).
Pérez <i>et al.</i> (2020)	Cisalhamento (c, ϕ) MR (triaxial) DP (triaxial) Simulações numéricas (previsão de desempenho)	100% agregados reciclados (RCD) <hr/> 100% agregados virgens	6% (ligante residual) 9% (água) <hr/> 4% (ligante residual) 6% (água)	Sem cura 3 dias à 50°C	Giratório	As misturas apresentaram comportamento não linear, sendo o MR afetado pelas tensões; Os maiores MR foram obtidos pela mistura de agregados virgens, para ambas as curas; A resistência ao cisalhamento, antes da cura, foi maior para mistura com RCD e, após a cura, as resistências foram similares; As misturas com RCD resultaram em menores DP; Todas as estruturas simuladas resistiram aos afundamentos sendo possível, portanto, o emprego de agregados de RCD em pavimentos.

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Resumo de alguns artigos envolvendo o estudo de misturas recicladas a frio com incorporação de emulsão asfáltica (parte 3).

Autor(es)	Propriedades avaliadas	Característica das misturas	Teores adicionados	Condições de cura	Método Compactação	Resultados obtidos
Orosa <i>et al.</i> (2020)	<i>Unconfined compressive strength</i> (UCS) <i>Retained strength ratio</i> (RSR=UCS _{wet} /UCS _{dry}) <i>Indirect tensile strength</i> (ITS) <i>Indirect tensile strength ratio</i> (ITSR=ITS _{wet} /ITS _{dry})	100% RAP	2,5; 2,92; 3,33; 3,75 e 4,17% (emulsão)	72h (50°C) + 24h imersão (60°C) + 2h imersão à 25°C (wet)	Estático (21 MPa durante 2min)	Os corpos de prova com teores residuais de ligante de 1,5%, 2% e 2,25% alcançaram os parâmetros UCS e RSR mínimos para categorias de baixo tráfego; As amostras não alcançaram a ITS mínima, mas o parâmetro ITSR foi atingido. Os autores sugeriram uma redução de 40% nos valores de ITS exigidos pela normativa espanhola; A adição de menores teores de água reduziu a ITS, sendo que as maiores quantidades proporcionaram uma melhor trabalhabilidade (mistura e compactação); A compactação estática alcançou as maiores densidades, inclusive superiores às de campo, sendo a giratória considerada mais adequada; O aumento no n° de giros elevou a ITS, mas o efeito nas densidades foi pequeno (<1%); A adição de cimento (1%) reduziu a ITS para os menores teores de ligante (1,5 e 2%). Já para os maiores teores (2,5 e 3%), a ITS aumentou; A cura acelerada interferiu na hidratação do cimento, sendo que esse tipo de material deve ser submetido a condições de temperatura e umidade mais convenientes.
			0 % (cimento)	72h (50°C) + 24h (25°C) + 2h imersão à 25°C (dry)		
			2,75; 2,33; 1,92; 1,5 e 1,08% (água)	72h (50°C) + 70h imersão (40°C) + 2,5h à 15°C (wet)	Giratório (100, 150 e 200 giros)	
0 e 1% (cimento)	72h (50°C) + 70h (20°C) + 2,5h à 15°C (dry)					
			0; 0,25; 1,08; 1,25; 1,75; 1,92; 2,25; 2,5; 2,75; 3,33; 4,17 e 5% (água)			

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Resumo de alguns artigos envolvendo o estudo de misturas recicladas a frio com incorporação de emulsão asfáltica (parte 4).

Autor(es)	Propriedades avaliadas	Característica das misturas	Teores adicionados	Condições de cura	Método Compactação	Resultados obtidos
Orosa <i>et al.</i> (2021)	Parâmetros volumétricos (densidade específica máxima, densidade geométrica inicial, densidade aparente, índice de vazios)	100% RAP	3,33% (emulsão) 1,92% (água)	3 dias à 50°C	Estático (21MPa durante 2min), giratório (50 até 500 giros) e por impacto (50 e 75 golpes/face)	As densidades antes da cura foram maiores, devido à presença de água nos vazios; A compactação giratória é o procedimento mais indicado para atingir as densidades alvo; A compactação estática com carga de 21 MPa excedeu a densidade necessária, não sendo indicada sua utilização; O método Marshall não alcançou as densidades necessárias, fato que prejudicou o desempenho volumétrico das misturas; Entre os três métodos avaliados, a compactação giratória foi considerada a mais adequada para ser utilizada em laboratório.
Orosa <i>et al.</i> (2022b)	MR (triaxial) Perda de umidade	100% RAP	2,5; 3,33; 4,17; 5 e 5,83% (emulsão) 0,25; 1,08; 1,75; 1,92; 2,25; 2,75; 3,25 e 3,75% (água)	MR (triaxial): 0, 3, 7, 30 e 60 dias à 20°C Perda de umidade: 0, 3, 7, 15, 30, 60 e 180 dias à 20°C	Giratório	Dependência do MR com a σ_3 , destacando o comportamento não linear das misturas; O período com maior perda de água (0 a 7 dias) resultou em um maior ganho de rigidez. Quando a evaporação foi baixa (30 a 60 dias), o MR aumentou de forma mais lenta; As amostras ensaiadas no dia 0 obtiveram MR similares (não houve influência da emulsão, apenas do esqueleto mineral); As misturas com 4,17% de emulsão produziram os melhores MR. A relação entre o MR e a perda de água se mostrou bastante linear.

Fonte: elaborado pelo autor.

3 DOSAGEM DE MISTURAS RECICLADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA

Este capítulo apresenta algumas metodologias utilizadas na dosagem de misturas recicladas a frio com incorporação de emulsão asfáltica. Em nível nacional, são abordadas e discutidas algumas normativas que tratam sobre a reciclagem profunda com incorporação de ligantes asfálticos. Vale destacar que apenas uma considera a adição de emulsão. Em um segundo momento, serão expostos alguns métodos de dosagem utilizados em nível internacional.

3.1 CENÁRIO NACIONAL

O DER-SP possui uma especificação técnica que aborda a reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com adição de emulsão, identificada pelo código ET-DE-P00/034. A normativa em questão estabelece que o projeto de dosagem da mistura deverá atender às seguintes condições: estabilidade Marshall a 40°C mínima de 5 kN, considerando um corpo de prova moldado com 75 golpes por face (método de ensaio NBR 12891); índice de vazios total máximo de 18% (método de ensaio NBR 12891); razão mínima entre a estabilidade Marshall, antes e após a imersão, de 70% (método de ensaio AASHTO 283).

Todas as demais normativas brasileiras relativas à reciclagem de pavimentos com ligantes asfálticos consideram a incorporação de espuma de asfalto. Geralmente, as normas apresentam as faixas granulométricas e alguns parâmetros mínimos que devem ser atendidos pela mistura reciclada. Em quase todas as normativas pesquisadas, a propriedade a ser levada em consideração na definição dos teores de projeto é a resistência à tração indireta (ITS, da sigla em inglês *Indirect Tensile Strength*). A fim de situar o leitor acerca das normativas nacionais existentes, foi elaborada uma tabela resumindo as principais informações contidas em cada uma das especificações pesquisadas. Essa síntese é exibida na tabela 3. Cabe destacar que a relação entre tensões (ITSR) consiste na relação entre a resistência à tração indireta na condição saturada (ITS_{wet}) e a resistência à tração indireta na condição seca (ITS_{dry}), obtidas através do ensaio de compressão diametral a 25°C (DER-PR, 2005).

Tabela 3 - Diretrizes de algumas normas brasileiras para reciclagem de pavimentos com adição de ligantes asfálticos.

Normativa	Aspecto					
	ITS _{dry}	ITS _{wet}	ITSR (ITS _{wet} /ITS _{dry})	Teor máximo de cimento	Restrições para execução	Liberação ao tráfego
DNIT 166/2013 - Reciclagem de pavimento a frio “ <i>in situ</i> ” com adição de espuma de asfalto	0,25 MPa	0,15 MPa	60%	Não faz referência	Dias chuvosos	Concluída a pintura de ligação
DNIT 169/2014 - Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto	0,25 MPa	0,15 MPa	60%	Não faz referência	Dias chuvosos	De acordo com o projeto
DEINFRA-SC ES-P-09/2016 - Reciclagem profunda de pavimentos	0,25 MPa	0,15 MPa	60%	1%	Dias chuvosos (Temp. < 5°C)	De acordo com a “pista de controle”
DER-SP ET-DE-P00/049 (2020) - Reciclagem de pavimento asfáltico em usina com adição de espuma de asfalto	0,225 MPa	0,1 MPa	50%	2% (melhor 1%)	Preferência para dias secos (evitar chuva)	3 a 5 dias (50% W _{ótima})
DER-SP ET-DE-P00/033 (2006) - Reciclagem “ <i>in situ</i> ” a frio com espuma de asfalto	0,4 MPa	0,2 MPa	50%	2% (melhor 1%)	Preferência para dias secos (evitar chuva)	3 a 7 dias
DER-SP ET-DE-P00/034 (2006) - Reciclagem de pavimento asfáltico “ <i>in situ</i> ” com emulsão(*)	5 kN (estabilidade Marshall)	Vazios <18%	70% (estabilidade após/antes imersão)	Não faz referência	Preferência para dias secos (evitar chuva)	Restrição mínima 2h
DER-PR ES-P 32/2005 - Reciclagem de pavimento a frio “ <i>in situ</i> ” com espuma de asfalto	0,4 MPa	0,2 MPa	70%	2 (melhor 1%)	Dias chuvosos (Temp. < 10°C)	Restrição mínima de 12h

(*) os parâmetros de aceitação da mistura reciclada são a estabilidade Marshall e o teor de vazios, diferentemente das demais normativas que consideram a ITS.

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2 CENÁRIO INTERNACIONAL

Em nível internacional, existem procedimentos detalhados para dosagem de misturas recicladas a frio com incorporação de ligantes asfálticos. São apresentados a seguir alguns desses métodos.

3.2.1 Método de dosagem da Wirtgen

Wirtgen (2012) cita que a primeira etapa de dosagem consiste na coleta “*in situ*” das camadas do pavimento inseridas no horizonte de reciclagem. Ensaio de granulometria, limites de Atterberg e compactação Proctor devem ser feitos para caracterizar cada um dos materiais coletados em campo. Após essa etapa, é determinada a composição da mistura a ser dosada. A proporção de cada material é calculada levando-se em consideração as densidades “*in situ*” e a espessura de cada camada reciclada. Os ensaios de caracterização são novamente realizados, mas agora na mistura representativa do horizonte de reciclagem. A metodologia apresenta uma faixa granulométrica que deve ser respeitada. Importante mencionar que, caso os materiais coletados em campo não cumpram esses requisitos, poderá ser feita a incorporação de agregados virgens à mistura, fazendo com que a granulometria preconizada seja alcançada.

Determinada a composição da mistura e feita a adequação granulométrica (caso necessário), o próximo passo consiste na avaliação do filer ativo. Wirtgen (2012) refere que se o índice de plasticidade (IP) da mistura for inferior a 10%, devem ser realizados ensaios de ITS a fim de verificar a necessidade ou não da adição do filer. Por outro lado, se o IP for superior a 10%, a mistura será previamente tratada com cal. As misturas estudadas na presente pesquisa são granulares (IP < 10%). Nesse caso, a metodologia determina a moldagem de seis corpos de prova, sendo dois confeccionados sem a presença de filer, dois com adição de 1% de cimento e outros dois com acréscimo de 1% de cal. Nessa etapa, todos os corpos de prova são produzidos com o mesmo teor de emulsão. Quanto ao processo de cura, três são submetidos à cura seca e outros três à cura seca + imersão. Dessa forma, é possível calcular o valor da resistência à tração retida (ITSR), parâmetro utilizado para definir a inclusão de filer na mistura. Quando a ITSR for superior a 60%, não é necessária sua adição. Se a ITSR for inferior a 60%, deve ser escolhido aquele filer que proporcionar o maior percentual para essa relação. Caso os valores obtidos para ITSR sejam muito próximos (diferença < 5%), poderá ser empregado tanto o cimento quanto a cal. A tabela 4 a seguir exibe o teor de emulsão a ser adicionado aos corpos de prova moldados

nessa etapa de dosagem. É possível visualizar que o percentual é definido em função da granulometria da mistura.

Tabela 4 - Diretrizes para adição da emulsão asfáltica pelo método da Wirtgen.

Passante peneira #0,075 mm	Percentual de emulsão (ligante residual)		Tipo de material
	Passante peneira #4,75 mm		
	< 50%	> 50%	
< 4%	3,3% (2%)	3,3% (2%)	Fresado asfáltico (RAP)
4-7%	3,7% (2,2%)	4% (2,4%)	RAP/brita graduada/cascalho natural/misturas
7-10%	4% (2,4%)	4,7% (2,8%)	
> 10%	4,3% (2,6%)	5,3% (3,2%)	Cascalho/areias

Fonte: elaborado pelo autor (adaptado de WIRTGEN, 2012).

Verificada a adição do filer ativo, a próxima etapa consiste na determinação do teor ótimo de fluido (OFC da sigla em inglês *optimum fluid content*) e da densidade seca máxima (MDD da sigla em inglês *maximum dry density*). Para obtenção dos parâmetros OFC e MDD deve ser aplicada a energia modificada, por meio da adição de um percentual constante de emulsão (vide tabela 4), sendo feita a variação na quantidade de água acrescentada. A curva de compactação deve ser determinada de acordo com o procedimento AASHTO T-180. Obtidos os parâmetros OFC e MDD, são produzidas as misturas para posterior moldagem dos corpos de prova, devendo ser seguidas as recomendações elencadas abaixo (WIRTGEN, 2012):

- a) Colocar a quantidade necessária de material na misturadora e determinar sua massa seca;
- b) Fixar a massa de filer ativo a ser adicionado (quando necessário) e estabelecer a quantidade de emulsão a ser acrescentada;
- c) Definir a quantidade de água a ser incorporada para obtenção do OFC e misturar os materiais até que uma homogeneidade seja alcançada;
- d) Colocar as amostras em um recipiente hermético, vedando-as imediatamente para que não haja perda de umidade.

O processo descrito acima é realizado em, no mínimo, quatro misturas, sendo adicionados os seguintes teores de ligante residual: teor inicial - 0,4%; teor inicial - 0,2%; teor inicial (vide tabela 4) e teor inicial + 0,2%. A quantidade de água incorporada também é uma variável, pois o OFC deve ser respeitado. Preparadas as misturas, o próximo passo consiste na moldagem dos

corpos de prova (total de 24). Devem ser confeccionados seis corpos de prova (100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura) para cada teor de emulsão, de acordo com as diretrizes listadas abaixo (WIRTGEN, 2012):

- a) Limpar o molde, o colarinho, a base e a superfície do martelo de compactação;
- b) Pesar material suficiente para obter uma altura após a compactação de 63,5 mm +/- 1,5 mm;
- c) Compactar a mistura aplicando 75 golpes com o martelo. Remover o molde e o colarinho e inverter o corpo de prova. Compactar a outra face com 75 golpes adicionais;
- d) Concluída a compactação, remover o molde da placa base e extrair a amostra com auxílio de um macaco de extrusão;
- e) Separar 1 kg das amostras após a compactação do segundo e do quinto corpo de prova, secando-as em estufa para determinação da umidade de moldagem.

Após a compactação, os corpos de prova são colocados em uma estufa a 40°C, sendo mantidos nessa condição até que seja obtida a constância de massa. Normalmente, um período de cura de 72 horas é suficiente. Depois de removidos da estufa, eles são resfriados a temperatura ambiente até alcançarem os 25°C. Atingida essa temperatura, três corpos de prova são rompidos para determinação da ITS_{dry} . Os três corpos de prova restantes são submetidos a um banho de imersão por 24 horas a 25°C e, tão logo sejam removidos da água, suas superfícies devem ser secas para determinação da ITS_{wet} . Os resultados obtidos são plotados graficamente para definir o teor de emulsão. Wirtgen (2012) especifica que misturas recicladas a frio estabilizadas com emulsão (tipo classe 1) devem possuir valores mínimos para ITS_{dry} e ITS_{wet} de, respectivamente, 225 kPa e 100 kPa.

3.2.2 Método de dosagem da Austroads

Austroads (2019) relata que, atualmente, há um uso limitado da técnica de reciclagem de pavimentos com emulsão asfáltica na Austrália. Os autores destacam que, nos locais onde essa técnica vem sendo aplicada, o processo empírico do projeto de mistura objetiva produzir materiais modificados com módulos aprimorados não susceptíveis ao trincamento por fadiga e elevada resistência ao afundamento. Taxas de aplicação de emulsão de 3% a 5% (2% a 3% de ligante residual) são habitualmente empregadas sendo que, quando necessário, cimento ou cal também poderão ser adicionados, normalmente à taxa de 1%.

A metodologia de dosagem da Austroads (2019) considera a incorporação de espuma de asfalto como agente estabilizante e, embora a presente pesquisa utilize emulsão, os procedimentos de dosagem, de uma forma geral, tratam a estabilização com ambos os ligantes de forma similar, permanecendo as mesmas diretrizes. Esse fato motivou o autor a incluir o método Austroads na presente revisão bibliográfica. Vale destacar que existem pequenas diferenças ao se incorporar um ou outro ligante à mistura, basicamente na etapa de obtenção dos parâmetros de moldagem (curvas de compactação). Caso a espuma seja adicionada, leva-se em consideração o teor ótimo de umidade (água apenas) e, ao se acrescentar emulsão, deve ser contabilizado o teor ótimo de fluido (água + emulsão) para o cálculo da MDD. A seguir são apresentadas as etapas envolvidas no processo de dosagem de misturas recicladas a frio estabilizadas com ligantes asfálticos:

- a) Obter uma amostra representativa dos materiais a serem estabilizados, incluindo a camada de revestimento (RAP);
- b) Determinar a granulometria e avaliar a necessidade de alguma correção mediante a adição de agregados virgens;
- c) Medir os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), determinar o IP e avaliar se o material precisa ou não ser previamente tratado;
- d) Selecionar o fíler ativo a ser utilizado (cal ou cimento);
- e) Obter os parâmetros de moldagem (umidade e densidade) através do ensaio Proctor (curva de compactação);
- f) Escolher os teores de ligante e fíler a serem incorporados à mistura;
- g) Acrescentar a água e o fíler, misturar e deixar a amostra curar por 45 minutos;
- h) Adicionar e homogeneizar o ligante asfáltico na mistura;
- i) Compactar pelo menos três corpos de prova em moldes com 152 mm de diâmetro aplicando 50 golpes por face com martelo Marshall de massa 10,2 kg;
- j) Curar os corpos de prova durante três horas a 25°C e medir o módulo inicial à tração indireta (M_i);
- k) Curar os corpos de prova por três dias a 40°C e medir o módulo à tração indireta na condição seca (M_d);
- l) Após a cura controlada seca (três dias a 40°C), colocar os corpos de prova em imersão em água por dez minutos (com aplicação de vácuo) e, logo após esse período, medir o módulo à tração indireta na condição imersa (M_w);
- m) Medir as densidades secas dos corpos de prova;
- n) Calcular a razão entre os módulos nas condições imersa e seca (M_w/M_d);
- o) Comparar os resultados obtidos com os parâmetros mínimos recomendados. Se os valores estiverem abaixo do indicado, o teor de ligante e/ou fíler deve ser majorado e, caso contrário, reduzido;
- p) Selecionar os teores de projeto para o ligante asfáltico e o fíler ativo.

De acordo com a Austroads (2019), os materiais estabilizados com ligantes asfálticos devem possuir um $IP \leq 10\%$ ou retração linear $\leq 6\%$, além de possuir uma granulometria que se enquadre dentro das faixas definidas em função do tráfego diário atuante na rodovia. Nos casos em que os materiais coletados “*in situ*” não consigam cumprir esses requisitos, deverão ser adicionados agregados virgens para fins de correção granulométrica ou um filer ativo como a cal para promover a redução do IP.

Austroads (2002) cita que a determinação do módulo inicial à tração indireta (M_i) busca avaliar se o pavimento poderá ser aberto ao tráfego assim que a execução da reciclagem em campo seja concluída. A compactação das amostras é feita com martelo Marshall mediante o emprego de 50 golpes por face. Esse ponto é uma atualização do antigo método de dosagem Austroads (2002), no qual também era permitida a compactação giratória com aplicação de 85 giros. Austroads (2002) refere que a aplicação de vácuo deve ser feita com uma pressão de 0,95 kPa.

A tabela 5 mostra os valores mínimos dos módulos a serem alcançados pelas misturas estabilizadas com ligantes asfálticos recicladas “*in situ*” de acordo com o método Austroads (2019). Pela análise da mesma, é possível verificar que quando a camada reciclada cumprir a função de base, os requisitos são determinados em função tráfego diário. Por outro lado, quando a camada reciclada desempenhar o papel de sub-base, o tráfego diário não altera os valores mínimos (exceto o módulo retido), que permanecem constantes.

Tabela 5 - Parâmetros mínimos para dosagem de misturas estabilizadas com ligantes asfálticos (método da Austroads).

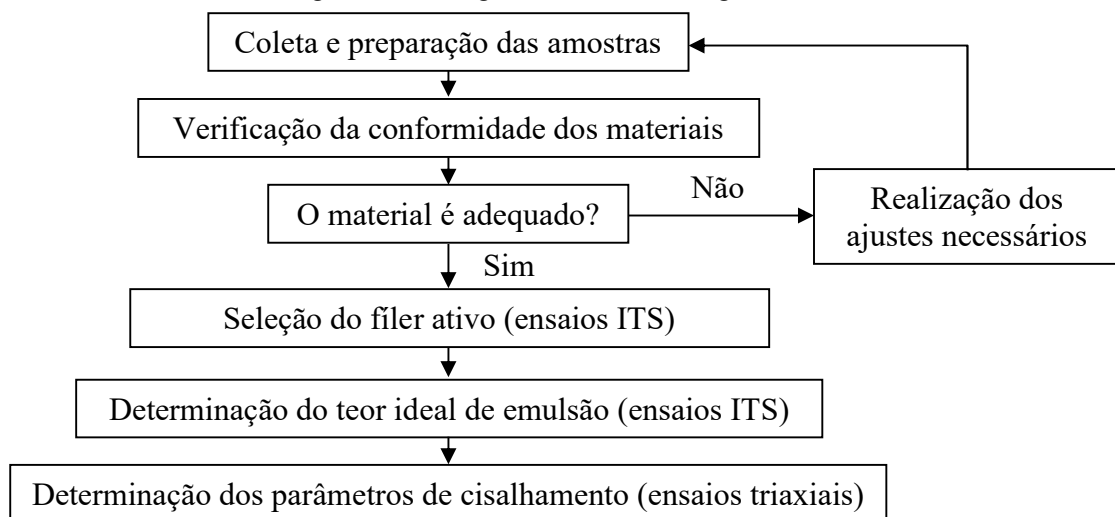
Tráfego diário (ESA)	M_i (3h à 25°C)	M_d (72h à 40°C)	M_w (imersão)	Módulo retido (M_w/M_d)	Camada reciclada
< 100	500 MPa	2500 MPa	1500 MPa	40%	Base
≥ 100	700 MPa	3000 MPa	1800 MPa	45%	
> 1000	-	4000 MPa	2000 MPa	50%	
< 100	500 MPa	2500 MPa	1500 MPa	40%	Sub-base
≥ 100	700 MPa	2500 MPa	1500 MPa	45%	
> 1000	-	2500 MPa	1500 MPa	50%	

Fonte: elaborado pelo autor (adaptado de AUSTROADS, 2019).

3.2.3 Método de dosagem da Southern African Bitumen Association (SABITA)

SABITA (2020) publicou recentemente a 3ª edição do TG2, documento que apresenta de forma detalhada o procedimento de dosagem utilizado na África do Sul. A figura 15 exibe um fluxograma contendo todas as etapas preconizadas por esse método, valendo destacar que ele será aplicado na presente pesquisa. A justificativa pela escolha de tal metodologia remete ao fato dela ser considerada a mais completa dentre aquelas analisadas pelo autor. A determinação do teor de emulsão a ser incorporado leva em consideração, além do parâmetro ITS, a resistência ao cisalhamento dos materiais. De forma adicional, os diversos artigos acadêmicos publicados por pesquisadores residentes naquele país evidenciam o excelente nível de conhecimento quando se trata do tema ora estudado.

Figura 15 - Fluxograma método de dosagem da SABITA.



Fonte: elaborado pelo autor (adaptado de SABITA, 2020).

O procedimento de dosagem SABITA (2020) pode ser considerado uma evolução do método Wirtgen (2012) apresentado anteriormente. Dessa forma, muitos aspectos constantes em ambas as metodologias são bastante parecidos. O TG2 relata que o primeiro passo consiste na coleta e preparação das amostras, a qual deve abranger todas as camadas incluídas no horizonte de reciclagem. Devem ser realizados ensaios de granulometria, limites de Atterberg e compactação Proctor nos materiais oriundos de cada uma das camadas e, determinadas suas proporções, os ensaios de caracterização devem ser novamente executados na mistura representativa da estrutura a ser reciclada “*in situ*”. Caso a granulometria não esteja de acordo com os limites especificados, poderá ser feita a incorporação de agregados virgens para fins de adequação. Em

se tratando de misturas com elevada plasticidade ($IP > 10\%$), o tratamento prévio com cal deve ser avaliado.

Ensaio de ITS devem ser realizados para selecionar o tipo de fíler ativo a ser aplicado nas misturas (caso necessário). A quantidade de emulsão adicionada nessa etapa é idêntica para todos os corpos de prova, sendo definida basicamente em função da granulometria. No capítulo de materiais e métodos esse ponto será abordado de forma mais detalhada. Três amostras devem ser preparadas para produzir três grupos de corpos de prova em que o fíler será a variável a ser considerada. Um conjunto de corpos de prova será confeccionado sem adição de fíler; no outro deve ser incorporado 1% de cimento e, por fim, 1% de cal hidratada.

Seis corpos de prova de 150 mm de diâmetro e 95 mm de altura são confeccionados para cada conjunto. O processo de compactação deve ser realizado mediante o emprego de um martelo vibratório, buscando simular a compactação realizada em campo. Os corpos de prova devem ser compactados, inicialmente, em duas camadas. Todavia, caso as densidades não sejam alcançadas após cada camada ser compactada por até 120 segundos, a vibração deve ser interrompida, aumentando-se o número de camadas e mantendo-se a altura total do corpo de prova constante. Após a compactação, os corpos de prova são submetidos a um processo de cura controlada, o qual será apresentado no capítulo de materiais e métodos.

A determinação da ITS deve ser feita para as condições seca e imersa (ITS_{dry} e ITS_{wet}). Os resultados obtidos são então utilizados como indicadores primários para definir o tipo de fíler a ser adicionado. Maiores valores de ITS_{wet} indicam uma maior compatibilidade do fíler com os componentes da mistura, devendo então ser incorporado para as moldagens subsequentes o fíler que proporcionar os melhores resultados para esse parâmetro. Caso os valores da ITS_{wet} sejam da mesma ordem de grandeza (diferença $< 5\%$), qualquer tipo de fíler pode ser selecionado. Em havendo um acréscimo inferior a 5% na ITS_{wet} quando comparados os conjuntos de corpos de prova moldados com e sem incorporação de fíler, a adição do mesmo pode ser descartada.

Uma vez que a seleção do fíler ativo tenha sido realizada, deve ser feita a determinação do teor ideal de emulsão a ser incorporado à mistura. Nessa etapa é realizada uma análise de sensibilidade, ou seja, os ensaios de ITS são executados em misturas contendo diferentes teores de emulsão. Para cada conjunto de corpos de prova deve ser aplicada uma taxa de emulsão

distinta daquela adicionada na etapa anterior (avaliação do filler). Vale lembrar que a taxa inicialmente aplicada é obtida de acordo com a granulometria da mistura reciclada. Os teores a serem adicionados nessa fase são: taxa inicial - 0,4%; taxa inicial - 0,2% e taxa inicial + 0,2%. No método da SABITA (2020) leva-se em consideração o teor de emulsão adicionado, diferentemente do método da Wirtgen (2012) no qual é considerada a taxa de ligante residual. Em ambos os casos, nota-se que os incrementos são realizados em intervalos de 0,2%.

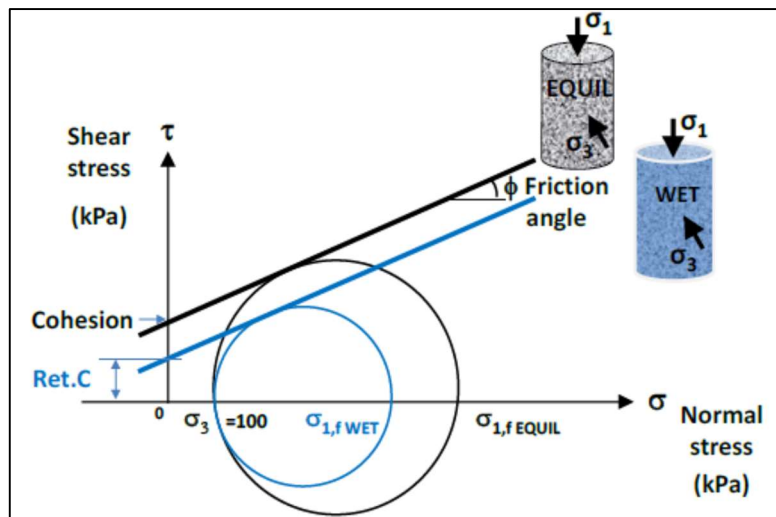
Seis corpos de prova são moldados para cada teor de emulsão, sendo todos submetidos a um processo de cura controlada seca. Passado esse período, três corpos de prova são colocados em imersão por 24 horas, a fim de determinar os valores de ITS_{dry} e ITS_{wet} . O conteúdo de emulsão que atender aos critérios de classificação é definido como o teor de projeto. Vale destacar que, de acordo com o TG2, uma mistura classe BSM1 deve obter resultados mínimos para ITS_{dry} e ITS_{wet} de, respectivamente, 225 kPa e 125 kPa. Para uma mistura classe BSM2, esses valores caem para 175 kPa e 100 kPa. Até esse ponto, as metodologias TG2 (SABITA, 2020) e Wirtgen (2012) possuem muitas similaridades. Todavia, o TG2 atribuiu uma etapa adicional para que o processo de dosagem seja concluído: a determinação dos parâmetros de cisalhamento da mistura, ou seja, sua coesão (c) e seu ângulo de atrito interno (ϕ).

Para determinação dos parâmetros de cisalhamento, devem ser confeccionados dez corpos de prova com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Nessa etapa, a emulsão é adicionada apenas no teor de projeto, além do 1% de filler ativo (caso necessário). O procedimento de cura dos corpos de prova a serem rompidos no ensaio triaxial de carregamento monotônico será discutido de forma detalhada no capítulo de materiais e métodos. O TG2 (SABITA, 2020) destaca que os parâmetros de cisalhamento (c , ϕ) dos BSM fornecem propriedades de desempenho críticas e que precisam ser avaliadas para que um projeto possa ser considerado confiável.

A compactação é feita com martelo vibratório em cinco camadas de igual altura, que devem ser devidamente escarificadas. Finalizada a moldagem, os corpos de prova são submetidos a um processo de cura controlada. Oito corpos de prova não são submetidos ao banho de imersão e, tão logo seja concluída a cura seca, devem ser encaminhados para o ensaio triaxial de carregamento monotônico, sendo rompidos em duplicata nas seguintes σ_3 : 0 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. A tensão máxima aplicada ($\sigma_{1,f}$) é então determinada para cada σ_3 para que sejam traçadas as envoltórias de Mohr-Coulomb, a partir das quais os parâmetros de cisalhamento são calculados.

Dois corpos de prova são submetidos a um banho de imersão (após concluída a cura controlada seca), sendo rompidos aplicando-se uma σ_3 de 100 kPa. A tensão máxima aplicada ($\sigma_{1,f}$) é então comparada com aquela obtida pelos corpos de prova não submetidos à imersão rompidos com a mesma σ_3 para determinação da coesão retida (RetC). Esse parâmetro é utilizado para determinar a resistência à umidade da mistura reciclada. A figura 16 ilustra, esquematicamente, a avaliação da coesão retida (RetC) realizada por meio dos resultados obtidos nos ensaios triaxiais de carregamento monotônico. A determinação da coesão (c), do ângulo de atrito (ϕ) e da coesão retida (RetC) é a última etapa preconizada pela metodologia TG2 (SABITA, 2020). Se os valores mínimos para esses parâmetros forem alcançados, o processo de dosagem pode ser considerado concluído.

Figura 16 - Avaliação da coesão retida (RetC).



Fonte: SABITA, 2020.

3.2.4 Método de dosagem da Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA)

ARRA (2018) destaca que a primeira etapa de um processo de dosagem é a coleta das amostras, que deve ser feita desde a superfície até a profundidade a ser reciclada. Dessa forma, é possível determinar se a estrutura do pavimento existente é adequada para o horizonte de reciclagem proposto. Os autores destacam que amostras adicionais podem ser obtidas para análise individual por parte do projetista quando observações visuais indicarem uma maior heterogeneidade de materiais dentro de um mesmo segmento ou se houver áreas com elevada

degradação. Vale destacar que o nível de amostragem é influenciado por diversos fatores, tais como: confiabilidade, nível de risco, duração do projeto e ensaios necessários.

O próximo passo consiste na determinação da granulometria. ARRA (2018) determina limites granulométricos que devem ser obedecidos pela mistura a ser dosada. Todos os agregados maiores que 38 mm (1 ½") deverão ser removidos e, caso o percentual passante na peneira n° 200 seja maior que 20%, deverá ser avaliado o uso de um aditivo estabilizador, como cimento ou cal, para que os requisitos de projeto sejam atendidos. Os autores também citam que deve ser feita a verificação do equivalente de areia (EA) e do IP das misturas, sendo que aquelas com $EA < 30\%$ e/ou $IP > 6\%$ requerem, normalmente, a adição de cimento ou cal para alcançar as exigências do projeto.

Os parâmetros de moldagem (densidade e umidade) devem ser obtidos através do ensaio Proctor na energia modificada. É indicado um mínimo de quatro pontos para obtenção da curva de compactação e, caso a mistura não proporcione uma curva bem definida, o teor de umidade ideal deve ser fixado entre 4% e 5% (ARRA, 2018).

O próximo estágio consiste na determinação dos teores de emulsão que serão adicionados. ARRA (2018) sugere que sejam incorporados teores de emulsão entre 1% e 4% com incrementos variando entre 0,5% e 1%. Essa metodologia não especifica a incorporação de um teor inicial em função da granulometria, fato que geralmente ocorre para os demais métodos apresentados. Um conjunto de seis corpos de prova deve ser confeccionado para cada teor de emulsão. Outros dois corpos de prova serão moldados para determinação da densidade máxima medida (G_{mm}), um contendo o maior e outro o menor teor de emulsão incorporados.

A próxima fase trata da mistura das amostras que deve ser realizada, preferencialmente, por misturadores mecânicos. ARRA (2018) cita que deve ser dada preferência para incorporação da cal ou cimento aos materiais secos, antes da adição da água. O último material a ser acrescentado é a emulsão, incorporada em temperatura específica (geralmente 60°C). Após a mistura dos materiais ser finalizada, as amostras deverão ser curadas individualmente em sacos plásticos vedados a uma temperatura de 40°C por 30 minutos, não devendo ocorrer nenhuma mistura ou aeração adicional durante esse período. Passado esse ínterim, a compactação pode ser iniciada.

A etapa de compactação é feita por um compactador giratório configurado da seguinte maneira: tensão de 600 kPa, ângulo de 1,25° e número total de giros igual a 30. Os corpos de prova devem ser compactados até atingirem uma altura de 75 mm (+/- 5) em um molde com 150 mm de diâmetro. Seis corpos de prova são confeccionados para cada teor de emulsão, sendo três curados em condição seca e outros três submetidos à imersão.

Tão logo a compactação seja concluída, os corpos de prova devem ser extrudados dos moldes, sendo colocados em uma estufa à 60°C por um período máximo de 48 horas. A metodologia não fixa um prazo de permanência dos corpos de prova em estufa, apenas cita que deverá ser atingida a constância de massa. Alcançada a constância de massa, os corpos de prova são removidos da estufa e resfriados a temperatura ambiente até chegarem aos 25°C, o que deve ocorrer em um intervalo de 12 a 24 horas. As amostras utilizadas para determinação da G_{mm} não devem ser compactadas e são curadas sob as mesmas condições, devendo ser ensaiadas após o resfriamento em um prazo máximo de 24 horas.

Após o período de cura, são calculadas algumas propriedades volumétricas como a densidade específica aparente (AASHTO T 331), densidade máxima medida – G_{mm} (AASHTO T 209) e teor de vazios (AASHTO T 269). A determinação da G_{mm} pode ser feita de duas maneiras: ensaiando duas amostras não compactadas contendo a maior quantidade de emulsão e, por correlação, determinar a G_{mm} para as demais taxas ou, ainda, determinar a G_{mm} de uma mistura contendo o maior e outra contendo o menor teor de emulsão e, através de uma interpolação, determinar a G_{mm} para os demais teores.

Medidas as propriedades volumétricas, os corpos de prova devem ser rompidos para determinação da ITS nas condições seca e úmida. No caso da ITS_{dry} , cada corpo de prova devidamente curado (máximo de 48 horas a 60°C) deve ser acomodado dentro de um saco plástico devidamente vedado e submetido à imersão em água a 25°C por um período entre 30 e 45 minutos. Outra opção destacada pelo método ARRA (2018) consiste na possibilidade de colocar os corpos de prova dentro de uma estufa a 25°C por um prazo de duas horas antes de rompê-los. Para obtenção da ITS_{wet} , os corpos de prova curados em estufa devem ser submetidos a um banho de imersão em água a 25°C por um período de 24 horas, sendo ensaiados logo depois. Por fim, o teor de emulsão selecionado para o projeto será aquele que cumprir os requisitos mínimos especificados.

3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS METODOLOGIAS DE DOSAGEM

Foram apresentados quatro métodos para dosagem de misturas recicladas a frio estabilizadas com ligantes asfálticos, sendo que cada um possui suas particularidades. O primeiro aspecto que pode ser destacado diz respeito aos métodos de compactação. Os procedimentos de dosagem Wirtgen (2012) e Austroads (2019) empregam a compactação Marshall com diferentes energias. Enquanto o primeiro aplica 75 golpes, o último utiliza 50 golpes em cada face do corpo de prova. Já a metodologia da ARRA (2018) indica o uso do compactador giratório, enquanto o método da SABITA (2020) preconiza a compactação vibratória. Os métodos de compactação influenciam o comportamento mecânico e o desempenho dos materiais. Pesquisas citadas anteriormente (MENESES, 2022) indicam que as misturas compactadas com martelo vibratório possuem maiores teores de vazio ($e\%$), enquanto as misturas moldadas com o compactador giratório apresentam os menores $e\%$. No caso das misturas confeccionadas pela compactação Marshall, os valores de $e\%$ ficam em um nível intermediário. Sabendo que o parâmetro $e\%$ influencia o valor da ITS, propriedade levada em consideração para definir o teor de projeto, é possível inferir que uma mesma mistura dosada por diferentes metodologias terá resultados distintos.

Com relação ao parâmetro utilizado para definir o teor de projeto, três metodologias (WIRTGEN, 2012; ARRA, 2018; SABITA, 2020) consideram a ITS. Apenas o método da Austroads (2019) analisa o módulo à tração indireta, ensaio não destrutivo vinculado à ITS. De forma adicional, o método da SABITA (2020) também preconiza a determinação da resistência ao cisalhamento, destacando-se como o procedimento de dosagem mais completo.

Quanto as condições de cura, também existem diferenças. Wirtgen (2012), Austroads (2019) e SABITA (2020) determinam a temperatura de 40°C por um período de 72 horas, enquanto ARRA (2018) considera 60°C por um prazo máximo de 48 horas. De qualquer forma, as metodologias citam que os corpos de prova devem atingir a constância de massa, sendo esse o aspecto considerado para removê-los da estufa. Todos os métodos determinam a imersão dos corpos de prova em água para avaliação do dano induzido por umidade.

Vale destacar que também existem diferenças nas faixas granulométricas recomendadas. De uma forma geral, os métodos de dosagem buscam garantir um teor mínimo de finos para que a emulsão consiga se dispersar de forma satisfatória. As faixas granulométricas dos métodos Wirtgen (2012) e SABITA (2020) são bastante próximas, sendo que o primeiro apresenta um

intervalo ligeiramente mais restritivo. Ambas as metodologias determinam um teor mínimo de finos de 2%. Já a Austroads (2019) considera os percentuais mínimos de 5% ou 8%, a depender do tráfego, para fração passante na peneira n° 200 (#0,075mm). A granulometria proposta pela ARRA (2018) não estabelece uma quantidade mínima de finos a ser observada. Na tabela 6 são resumidas as principais informações de cada uma das metodologias de dosagem.

A análise da tabela 6 permite algumas considerações. Primeiramente, destaca-se que as misturas classificadas como classe 1 (SABITA, 2020) possuem parâmetros de dosagem superiores quando comparadas as de classe 2. Outro aspecto que merece ser realçado é com relação ao percentual de RAP. É possível perceber que, para misturas com teores de RAP acima de 50%, os valores mínimos de coesão são maiores e, por outro lado, há uma redução no ângulo de atrito. O método ARRA (2018) considera dois critérios de aceitação, um para materiais tipo 1 e outro para misturas tipo 2. Cabe esclarecer que as misturas tipo 1 contém uma quantidade de material passante na peneira n° 200 (#0,075 mm) inferior à 8%, sendo as demais classificadas como tipo 2. Ressalta-se que na metodologia ARRA (2018) existe uma preocupação em se manter uma proporção mínima entre os teores de ligante residual e cimento adicionados, visando prevenir que a mistura reciclada apresente um comportamento muito rígido.

Wirtgen (2012) cita que quando níveis mais elevados de confiabilidade forem exigidos para projetos de pavimentos com elevadas solicitações como, por exemplo, pistas de decolagem em aeroportos importantes, uma série de ensaios triaxiais pode ser realizada. Os autores relatam que esses experimentos são considerados especializados e não estão embarcados no escopo da metodologia, ou seja, apesar de o método apresentar valores mínimos para os parâmetros de cisalhamento, quando esses ensaios forem de fato necessários, deverão ser seguidas as recomendações constantes no TG2 (2009).

Por fim, é importante afirmar que, no caso das misturas recicladas a frio, o RAP é considerado simplesmente uma “rocha negra” (“*black rock*”), ou seja, o teor de ligante oxidado presente nele não é considerado para fins de projeto de dosagem de misturas (WIRTGEN, 2012). Realizada a descrição das metodologias de dosagem, no próximo capítulo será feita uma breve apresentação sobre os parâmetros de resistência e deformabilidade de pavimentos flexíveis.

Tabela 6 - Resumo de algumas metodologias para dosagem de misturas recicladas a frio com incorporação de emulsão asfáltica.

Método	Compactação	Condições de cura	Dimensão dos corpos de prova (mm)	Parâmetros de dosagem (teor de projeto)	
				Classe 1/Tipo 1	Classe 2/Tipo 2
Wirtgen (2012)	Marshall (75 golpes)	ITS _{dry} : 72h a 40°C + resfriamento à 25°C	100x63,5 ou 150x95 (ITS)	ITS _{dry} : > 225 kPa ITS _{wet} : ≥ 100 kPa	ITS _{dry} : > 125 kPa ITS _{wet} : ≥ 50 kPa
		ITS _{wet} : 72h a 40°C + 24h imersão à 25°C	150x300 (triaxial)	Coesão: > 250 kPa Ângulo de atrito: > 40°	Coesão: > 50 kPa Ângulo de atrito: > 25°
ARRA (2018)	Giratória (30 giros/600 kPa)	Antes da compactação: 30min a 40°C (sacos vedados) ITS _{dry} : 48h a 60°C + 24h a 25°C + 45min imersão a 25°C (sacos vedados) ou 2h a 25°C (estufa) ITS _{wet} : 48h a 60°C + 24h a 25°C + 24h imersão a 25°C	150x75	ITS _{dry} : ≥ 276 kPa ITS _{wet} : ≥ 172 kPa Proporção entre o ligante residual e o cimento: mínimo de 2,5:1	ITS _{dry} : ≥ 241 kPa ITS _{wet} : ≥ 138 kPa Proporção entre o ligante residual e o cimento: mínimo de 2,5:1
Austroroads (2019)	Marshall (50 golpes)	M _i : 3h a 25°C M _d : 72h a 40°C M _w : 72h a 40°C + 10min de imersão (vácuo)	152x95	M _i , M _d , M _w e M _w /M _d : vide tabela 5	M _i , M _d , M _w e M _w /M _d : vide tabela 5
SABITA (2020)	Vibratória (máximo 2 min./camada)	ITS _{dry} : 76h a 40°C + 20h a 25°C ITS _{wet} : 76h a 40°C + 24h de imersão a 25°C	152x95 (ITS)	ITS _{dry} : ≥ 225 kPa ITS _{wet} : ≥ 125 kPa Coesão: ≥ 250 (< 50% RAP) ou 265 kPa (> 50% RAP)	ITS _{dry} : ≥ 175 kPa ITS _{wet} : ≥ 100 kPa Coesão: ≥ 200 (< 50% RAP) ou 225 kPa (> 50% RAP)
		c _{dry} e φ _{dry} : 8h a 40°C + 48h a 40°C (sacos vedados) + 12h a 25°C (sacos vedados) c _{wet} e φ _{wet} : 8h a 40°C + 48h a 40°C (sacos vedados) + 24h de imersão a 25°C	150x300 (triaxial)	φ: 40° (< 50% RAP) ou 38° (≥ 50% RAP) RetC: ≥ 75%	φ: 38° (< 50% RAP) ou 35° (≥ 50% RAP) RetC: ≥ 65% (< 50% RAP) ou ≥ 75% (≥ 50% RAP)

Fonte: elaborado pelo autor.

4 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E DEFORMABILIDADE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A presente pesquisa se propõe a determinar os parâmetros de resistência e deformabilidade – coesão, ângulo de atrito interno e módulo de resiliência – de duas misturas estabilizadas com emulsão asfáltica para emprego em pavimentos flexíveis. Dessa maneira, é apresentada a seguir uma breve revisão bibliográfica sobre esse assunto.

4.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A determinação do módulo de resiliência dos materiais granulares é feita mediante a realização de ensaios triaxiais. Malysz (2004) destaca que nesses experimentos são aplicadas cargas cíclicas a fim de se obter o comportamento elástico dos materiais em função do estado de tensões, sendo importante a determinação do módulo de resiliência para mapear o comportamento tensão-deformação das camadas estruturais de pavimentos sujeitos a cargas repetidas de curta duração. O módulo de resiliência é calculado através da equação (1):

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

Onde:

MR = módulo de resiliência;

σ_d = tensão desvio;

ε_r = deformação resiliente.

Malysz (2009) refere que solos e agregados, ao serem solicitados por carregamentos cíclicos, se deformam. Essa deformação é composta por uma parcela elástica ou resiliente (Δh_r) e uma parcela plástica ou permanente (Δh_p). A deformação elástica, utilizada para calcular o módulo de resiliência, é determinada pela equação (2). A figura 17 ilustra a resposta típica de um corpo de prova quando solicitado por cargas repetidas.

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta h_r}{H_o} \quad (2)$$

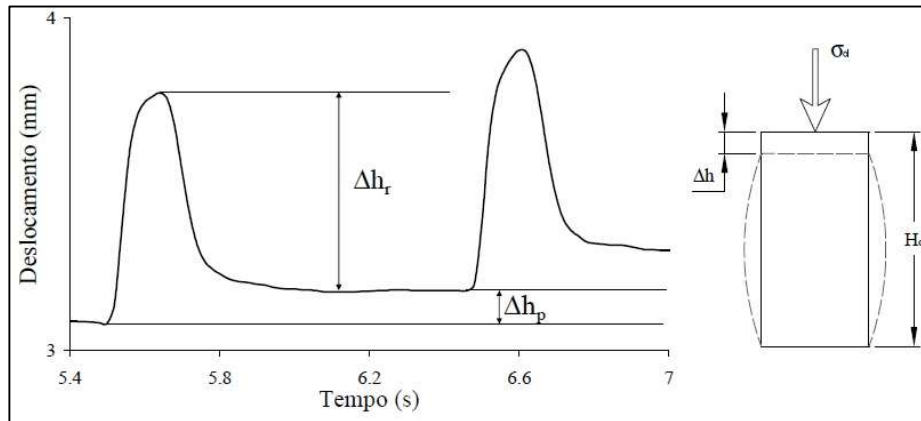
Onde:

ε_r = deformação resiliente;

Δh_r = variação na altura do corpo de prova em cada ciclo de carga;

H_o = altura inicial do corpo de prova.

Figura 17 - Resposta típica de um corpo de prova em um ensaio triaxial de cargas repetidas.



Fonte: Malysz, 2009.

Aqui no Brasil, o ensaio triaxial de módulo de resiliência é normatizado pela especificação DNIT 134/2018-ME. Esse documento especifica que as cargas cíclicas devem ser aplicadas com frequência de 1 hertz (Hz), sendo o tempo de duração da carga de 0,1 segundo, seguido por um período de repouso de 0,9 segundo até que o próximo ciclo de carregamento seja iniciado. O ensaio é dividido em duas etapas, sendo a primeira denominada condicionamento. Nessa fase, cujo objetivo é a eliminação das deformações permanentes, são aplicados 500 ciclos de carregamento em cada um dos três pares de tensão, totalizando 1500 (um mil e quinhentas) repetições. O próximo estágio trata da realização do ensaio propriamente dito sendo empregados, no caso dos materiais granulares, 18 pares de tensão. Em cada um dos pares aplica-se um mínimo de dez ciclos de carga, sendo feita a aquisição dos dados de deslocamento nos últimos cinco. O módulo de resiliência é calculado utilizando-se a média das cinco leituras obtidas.

Para interpretar os resultados do ensaio e mapear o comportamento tensão-deformação dos materiais são utilizados modelos de regressão relacionando o módulo de resiliência com o estado de tensões. Um dos modelos comumente empregados a nível nacional é denominado $k-\sigma_3$, que correlaciona o módulo com a tensão confinante e geralmente obtém coeficientes de

determinação R^2 bastante satisfatórios para materiais granulares, sendo representado pela equação (3):

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (3)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência;

σ_3 = tensão confinante;

k_1 e k_2 = parâmetros do modelo.

Hicks (1970) propôs um modelo conhecido como k- θ , que descreve o módulo de resiliência em termos do somatório das tensões principais, apresentado na equação (4):

$$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (4)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência;

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3 = \sigma_d + 3 \cdot \sigma_3$;

σ_1 = tensão principal maior;

σ_2 = tensão principal intermediária;

σ_3 = tensão principal menor;

k_1 e k_2 = parâmetros do modelo.

Orosa *et al.* (2022b) destacam que uma das principais vantagens do modelo k- θ é a sua simplicidade, pois ele considera que a resposta elástica é influenciada exclusivamente pelas tensões principais, sendo negligenciado o efeito das tensões cisalhantes. Mesmo assim, os autores citam que o modelo ainda é um dos mais utilizados para materiais granulares.

Uzan *et al.* (1992) desenvolveram um modelo que considera, além do somatório das tensões principais, o efeito da tensão desvio no módulo de resiliência. Essa relação é expressa pela equação (5):

$$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (5)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência;
 $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2.\sigma_3 = \sigma_d + 3.\sigma_3$;
 σ_1 = tensão principal maior;
 σ_2 = tensão principal intermediária;
 σ_3 = tensão principal menor;
 σ_d = tensão desvio;
 k_1, k_2 e k_3 = parâmetros do modelo.

A pesquisa de Orosa *et al.* (2022b) refere que, em muitos casos, o comportamento tensão-deformação dos materiais granulares também é influenciado pela magnitude das deformações de cisalhamento e que, quando essas misturas recebem a incorporação de ligante asfáltico, desenvolve-se um certo grau de coesão. De acordo com os autores, isso motivou Uzan *et al.* (1992) a buscarem um modelo que considerasse, também, o efeito da σ_d na resposta elástica dos materiais.

Feita a apresentação dos principais aspectos envolvidos na determinação do módulo de resiliência triaxial, serão abordados no próximo item, de forma resumida, os parâmetros de cisalhamento.

4.2 PARÂMETROS DE CISALHAMENTO

A determinação da resistência ao cisalhamento dos materiais é feita através da realização de ensaios triaxiais de carregamento monotônico. A execução de tais experimentos preconiza o emprego de uma σ_3 que atue de forma isotrópica sobre o corpo de prova, sendo aplicada uma σ_d até que a ruptura por cisalhamento seja alcançada. Malysz (2004) destaca que a resistência ao cisalhamento pode ser definida como a tensão cisalhante atuante no plano de ruptura quando o rompimento do corpo de prova ocorre.

A coesão (c) e o ângulo de atrito (ϕ) podem ser calculados traçando-se envoltórias de Mohr-Coulomb. A resistência ao cisalhamento vincula-se aos parâmetros c e ϕ por meio da equação (6). Destaca-se que a coesão é o ponto no qual a reta que representa a envoltória de ruptura toca o eixo das abscissas, enquanto o ângulo de atrito é definido pela sua inclinação.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\phi \quad (6)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento;

c = coesão;

σ = tensão normal em que a envoltória de ruptura tangencia o círculo de Mohr;

ϕ = ângulo de atrito interno.

A tensão de ruptura ($\sigma_{1,f}$) é calculada em função dos parâmetros c e ϕ , podendo ser estimada para qualquer σ_3 . A determinação da $\sigma_{1,f}$ é feita de acordo com a equação (7):

$$\sigma_{1,f} = \frac{(1+\text{sen } \phi) \cdot \sigma_3 + 2 \cdot c \cdot \cos \phi}{(1-\text{sen } \phi)} \quad (7)$$

Onde:

$\sigma_{1,f}$ = tensão de ruptura;

c = coesão;

ϕ = ângulo de atrito interno;

σ_3 = tensão confinante.

A interpretação dos resultados também pode ser feita através dos diagramas p-q (LAMBE e WHITMAN, 1969), determinados por meio das curvas tensão *versus* deformação. Os pontos p e q devem ser plotados graficamente e, logo após, deve ser determinada a reta que possibilite o melhor ajuste junto a esses pontos, denominada linha k_f . Todos esses conceitos são utilizados no cálculo dos parâmetros c e ϕ . Lambe e Whitman (1969) destacam que quando forem realizados vários ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento, os resultados devem ser interpretados, preferencialmente, pelo diagrama p-q. Isso se deve à maior facilidade de ajuste do diagrama quando comparado aos círculos de Mohr. As equações (8) e (9) apresentam, respectivamente, o cálculo para obtenção dos pontos p e q.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (8)$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (9)$$

Onde:

p = média das tensões principais;

q = metade da tensão desvio;
 σ_1 = tensão vertical;
 σ_3 = tensão confinante.

Os diagramas p-q possibilitam a determinação dos parâmetros “a” e “ α ” por meio da equação (10), que representa um ajuste genérico da linha k_f . As relações entre “a” e “ α ” e os parâmetros de resistência ao cisalhamento são determinadas, respectivamente, pelas equações (11) e (12). A figura 18 ilustra esquematicamente um diagrama p-q.

$$q = a + p \cdot \tan\alpha \quad (10)$$

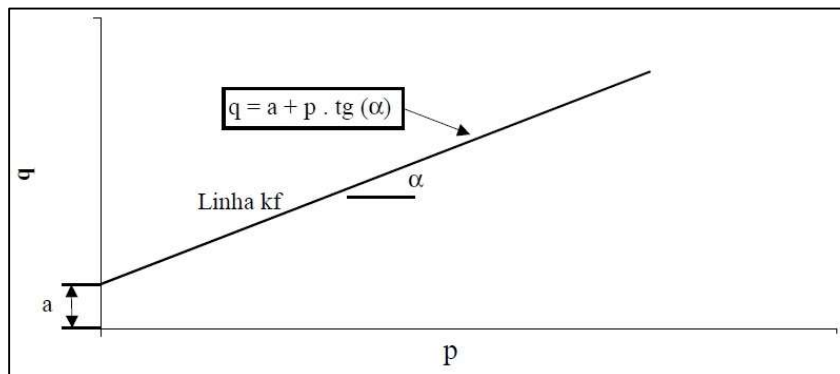
$$c = \frac{a}{\cos\phi} \quad (11)$$

$$\sin\phi = \tan\alpha \quad (12)$$

Onde:

a e α = parâmetros do diagrama p-q;
 c = coesão;
 ϕ = ângulo de atrito interno.

Figura 18 - Representação do diagrama p-q.



Fonte: Malysz, 2009.

Jenkins *et al.* (2021) consideram que os parâmetros de cisalhamento são críticos e que essas propriedades estão fortemente ligadas ao desempenho dos BSM. De acordo com os autores, a performance desses materiais pode ser medida em função da taxa de acúmulo de deformações plásticas e, levando em consideração a coesão (c), o ângulo de atrito (ϕ) e a coesão retida (RetC), propuseram a classificação de desempenho apresentada na tabela 7.

Tabela 7 - Classificação de desempenho dos BSM a partir das propriedades de cisalhamento.

Classe de desempenho	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (ϕ)	Coesão retida (RetC)	Classe de tráfego (MESA*)
Muito ruim	< 225	< 35°	< 65%	< 0,5
Ruim	< 250	< 38°	< 75%	< 1,6
Moderada	< 265	< 40°	< 85%	< 12
Boa	> 265	> 40°	> 85%	> 12

(*) *Millions of Equivalent 80 kN Standard Axles* (MESA): significa milhões de eixos padrão equivalentes a 80 kN, calculados considerando os fatores de equivalência de carga da AASHTO.

Fonte: elaborado pelo autor (adaptado de Jenkins *et al.*, 2021).

A análise da tabela 7 permite algumas considerações. Primeiramente, vale destacar que quanto maior a resistência ao cisalhamento dos BSM, melhor a sua classe de desempenho e, conseqüentemente, maior o volume de tráfego suportado por essas misturas. Um segundo ponto a ser destacado é que, levando em consideração os parâmetros de dosagem estabelecidos pela metodologia SABITA (2020), as misturas qualificadas como classe 1 estão inseridas nas categorias de desempenho moderada ou boa.

Concluída a revisão bibliográfica, na qual estão inseridos os capítulos 2, 3 e 4, serão apresentados no próximo capítulo os materiais e os métodos empregados no presente estudo.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados o programa experimental e os materiais e métodos empregados na presente pesquisa.

5.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente programa experimental foi elaborado com base na metodologia de dosagem da SABITA (2020). De forma adicional, foram realizados ensaios triaxiais para determinação do módulo de resiliência, além de ser verificada a influência do tempo de cura nesse parâmetro. As misturas estudadas na presente pesquisa são compostas por materiais que fazem parte das camadas estruturais de inúmeras rodovias brasileiras.

Os experimentos realizados neste estudo podem ser classificados como ensaios de caracterização mecânica. Como variáveis controláveis foram estabelecidos o teor de RAP e o tempo de cura para determinação do módulo de resiliência. Quanto ao conteúdo de cimento, optou-se pelo teor de 1%, destacando-se que não foi incluída no programa experimental a etapa de dosagem que versa sobre a seleção do filer ativo.

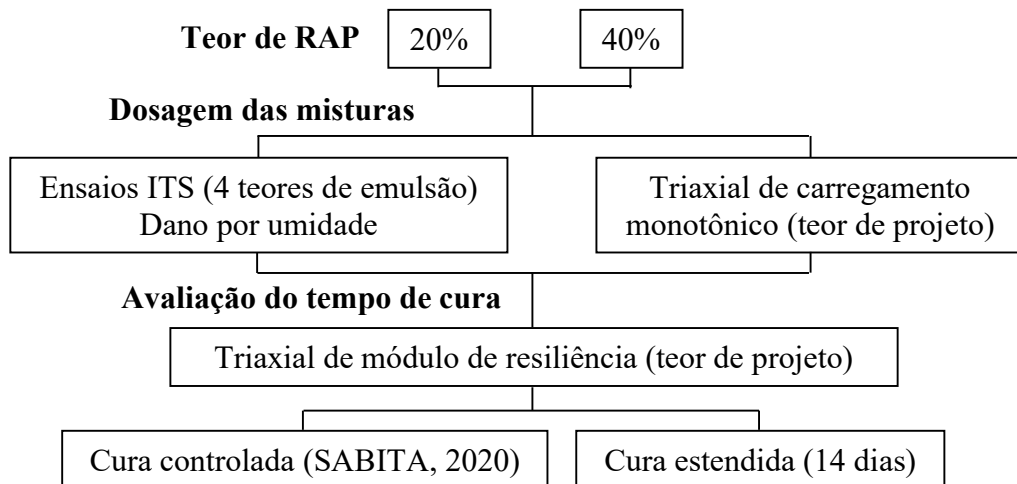
Optou-se pela utilização de dois conteúdos de RAP nas misturas, iguais a 20% e 40%. O primeiro teor foi definido buscando simular a técnica de reciclagem FDR em uma estrutura de pavimento com revestimento asfáltico delgado, enquanto o segundo, uma camada de CBUQ com espessura intermediária. Além do RAP, foi incorporada às misturas BGS, simulando a camada subjacente de base. Dessa forma, as duas misturas estudadas na presente pesquisa possuem as seguintes composições: 80% BGS/20% RAP e 60% BGS/40% RAP. Considerando um horizonte de reciclagem de 25 cm, essas combinações de materiais representam as seguintes estruturas de pavimento: 5 cm de CBUQ (20% RAP)/20 cm de base (80% BGS) e 10 cm de CBUQ (40% RAP)/15 cm de base (60% BGS). O exemplo ora apresentado levou em consideração apenas a espessura das camadas. A determinação exata dos percentuais de cada material deve ser feita levando-se em consideração a densidade *in situ* dos materiais. Maiores informações sobre esse cálculo podem ser obtidas no documento da Wirtgen (2012).

Os corpos de prova moldados para realização do ensaio triaxial de módulo de resiliência foram submetidos a dois períodos de cura distintos: cura controlada, de acordo com as condições

preconizadas pela metodologia SABITA (2020) e cura estendida, na qual o ensaio foi realizado passados 14 dias desde a confecção dos corpos de prova, respeitadas as condições iniciais da cura controlada. A escolha desses períodos foi feita após a leitura do trabalho da NCHRP (2021), no qual os autores revisaram 83 especificações técnicas de agências e órgãos reguladores dos Estados Unidos e Canadá, sendo verificado que o tempo de cura exigido para liberação das camadas recicladas ao tráfego encontra-se compreendido entre 1 hora e 14 dias. Dessa forma, buscando avaliar a ocorrência de algum incremento na rigidez das misturas, foi considerado o maior período preconizado pelas normativas revisadas pelo NCHRP (2021).

A figura 19 ilustra, esquematicamente, o programa experimental. Já na tabela 8 são exibidas as características das misturas estudadas, sendo possível visualizar seus códigos de identificação. Destaca-se que esses códigos serão utilizados na sequência do trabalho.

Figura 19 - Esquema do programa experimental da presente pesquisa.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Resumo das misturas estudadas no presente trabalho.

Cimento	BGS	RAP	Tipo de cura	Código da mistura
1%	80%	20%	Controlada	80%BGS_20%RAP_CONT.
1%	60%	40%	Controlada	60%BGS_40%RAP_CONT.
1%	80%	20%	Estendida	80%BGS_20%RAP_EST.
1%	60%	40%	Estendida	60%BGS_40%RAP_EST.

Fonte: elaborado pelo autor.

5.2 MATERIAIS

Neste item são apresentados os materiais utilizados no presente estudo, ou seja, o RAP, a BGS, o cimento e a emulsão asfáltica empregados na confecção das misturas.

5.2.1 Materiais procedentes da coleta de campo (RAP e BGS)

A BGS foi coletada pelo próprio autor junto a um fornecedor localizado no município de Eldorado do Sul/RS, distante aproximadamente 41 km do centro de Porto Alegre/RS. A figura 20 ilustra o maciço rochoso granítico do qual o agregado foi extraído bem como a usina de base utilizada na produção da BGS. O material foi armazenado em duas bombonas plásticas de 200 litros, as quais foram mantidas em um depósito fechado até que a BGS fosse utilizada no programa experimental.

Figura 20 - Maciço rochoso granítico (à esquerda) e usina utilizada na produção da BGS (à direita).



Fonte: arquivo pessoal do autor.

O RAP também foi coletado pelo próprio autor em um depósito localizado às margens da rodovia BR-290 (km 134), próximo ao município de Eldorado do Sul/RS, distante aproximadamente 43 km do centro de Porto Alegre/RS. Cabe destacar que não foi possível obter informações acerca do tipo de CAP presente no RAP, dados a respeito da máquina fresadora utilizada na produção do agregado e tampouco sobre o período em que o material permaneceu estocado. O RAP foi armazenado em uma bombona plástica de 200 litros, a qual foi mantida em um depósito fechado até que o agregado fosse empregado no programa experimental. A figura 21 mostra a localização geográfica e uma visão geral do local da coleta. Já na figura 22 são exibidas, em detalhe, as amostras de BGS e RAP obtidas.

Figura 21 - Localização (à esquerda) e visão geral do depósito de RAP (à direita).



Fonte: arquivo pessoal do autor.

Figura 22 - Detalhe das amostras de BGS (à esquerda) e RAP (à direita).



Fonte: arquivo pessoal do autor.

5.2.2 Cimento

Inicialmente, a ideia era utilizar o mesmo tipo de cimento empregado por Fedrigo (2015), classificado como CP II E. Todavia, essa categoria de cimento possui escória de alto forno em sua composição e sua comercialização é bastante restrita na região sul do Brasil. Dessa forma, optou-se por utilizar o cimento do tipo CP IV-32, facilmente encontrado no estado do RS e que possui até 50% de cinza volante em seu arranjo. A escolha da classe intermediária de resistência (32 MPa) pode ser justificada, de acordo com Fedrigo (2015), pelo fato de haver diversas experiências com o uso desse tipo de cimento em serviços de reciclagem de pavimentos. SABITA (2020) relata que podem ser utilizados diversos tipos de cimento na estabilização de misturas a frio com emulsão, devendo ser evitados aqueles com endurecimento rápido.

5.2.3 Emulsão asfáltica

Foi utilizada uma emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos de ruptura lenta, do tipo RL1C-E. Denominada Recycla RP, o ligante foi fornecido por uma empresa parceira da presente pesquisa. GRECA Asfaltos [2021?] destaca em seu portfólio de produtos que a Recycla RP está inserida na categoria das emulsões especiais, sendo seu uso recomendado para reciclagem do tipo FDR. O catálogo ainda cita que Recycla é a linha de emulsões indicada para produção de misturas a frio com utilização de até 100% de RAP, atuando diretamente na reativação das características aglutinantes do ligante (CAP).

5.3 MÉTODOS

Este item apresenta os métodos empregados tanto na caracterização dos materiais quanto nos ensaios realizados no programa experimental da presente pesquisa.

5.3.1 Caracterização dos agregados (RAP e BGS)

A caracterização dos materiais pétreos foi feita mediante a realização dos ensaios elencados abaixo. Cabe destacar que apenas a granulometria foi determinada pelo autor nas dependências da UFRGS, sendo todos os demais ensaios executados pelo próprio fornecedor da BGS.

5.3.1.1 Análise granulométrica (RAP e BGS)

Para determinação da curva granulométrica foram seguidas as diretrizes constantes no método de ensaio DNER-ME 083 (DNIT, 1998). A quantidade de material peneirado foi definida em função da dimensão máxima característica dos agregados, que, no presente caso, foi de 38 mm para ambos os materiais. Dessa maneira, foram peneiradas amostras de 15 kg, tanto para o RAP quanto para a BGS. Em função dos resultados individuais foram determinadas as curvas granulométricas das duas misturas estudadas (80%BGS_20%RAP e 60%BGS_40%RAP). Os ensaios dessa etapa foram realizados no Laboratório de Geotecnologia (LAGEOtec/UFRGS).

5.3.1.2 Ensaio de compactação (BGS)

O ensaio de compactação no agregado tipo BGS foi executado seguindo as orientações constantes na normativa ABNT NBR 7182/17, sendo aplicada a energia modificada.

5.3.1.3 Equivalente de areia (BGS)

A determinação do equivalente de areia, feita apenas no agregado tipo BGS, seguiu as diretrizes constantes na normativa DNER-ME 054/97 (DNER, 1997).

5.3.1.4 Determinação da abrasão “Los Angeles” (BGS)

O ensaio para determinação da abrasão “Los Angeles”, realizado apenas no material do tipo BGS, seguiu as recomendações constantes na normativa DNER-ME 035/98 (DNER, 1998).

5.3.2 Caracterização da emulsão asfáltica

A caracterização da emulsão asfáltica foi feita mediante a realização dos ensaios apresentados a seguir. Cabe destacar que todos os experimentos foram executados no laboratório do próprio fornecedor não sendo, portanto, desenvolvidos nas dependências da UFRGS.

5.3.2.1 Determinação da viscosidade Saybolt Furol

A determinação da viscosidade Saybolt Furol foi feita de acordo com a normativa ABNT NBR 14491/07, sendo esse um parâmetro importante para conhecer a trabalhabilidade da emulsão.

5.3.2.2 Determinação da sedimentação

O ensaio para determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem seguiu as recomendações constantes na norma ABNT NBR 6570/16.

5.3.2.3 Determinação da peneiração

O experimento para calcular a peneiração seguiu as diretrizes constantes na norma ABNT NBR 14393/12, sendo esse um ensaio que busca avaliar a qualidade aplicada na produção da emulsão.

5.3.2.4 Ensaio de carga de partícula

Para determinação da carga de partícula foi aplicada a norma ABNT NBR 6567/15.

5.3.2.5 Determinação do teor do resíduo seco

O teor do resíduo seco, também denominado resíduo por evaporação, foi determinado de acordo com a normativa ABNT NBR 14376/19.

5.3.2.6 Determinação do pH

O ensaio para determinação do pH foi executado conforme a norma ABNT NBR 6299/12.

5.3.3 Caracterização das misturas (RAP + BGS + cimento + emulsão)

A caracterização das misturas foi feita mediante a obtenção das curvas de compactação. A partir das granulometrias individuais de cada material, foi possível determinar as curvas granulométricas das duas misturas, considerando os diferentes percentuais de RAP adicionados.

5.3.3.1 Granulometria das misturas

As curvas granulométricas foram determinadas a partir das granulometrias individuais obtidas para o RAP e para a BGS. Dessa maneira, foi possível verificar se a granulometria das misturas se encontrava dentro do intervalo preconizado pelo método de dosagem SABITA (2020).

5.3.3.2 Ensaio de compactação

A obtenção das curvas de compactação buscou determinar os parâmetros de moldagem ($\gamma_{dm\acute{a}x}$ e OFC) para as duas misturas presentes no programa experimental. Para isso, foram seguidas as orientações contidas no método de ensaio DNIT-ME 164 (DNIT, 2013), com algumas adaptações. Primeiramente, cabe destacar que foram eliminadas todas as partículas retidas na peneira de #19mm (3/4”), tanto no RAP quanto na BGS, não havendo a substituição dessa parcela de agregados graúdos pela fração de material compreendida entre as peneiras de #19mm e #4,8mm, aspecto recomendado pela normativa supracitada. Todavia, de acordo com o TG2 (SABITA, 2020), quando houver material retido na peneira #20mm, o mesmo deverá ser levemente triturado até que sua totalidade passe por essa abertura, devendo essa parcela ficar retida na malha de #14mm. Na impossibilidade de reduzir o tamanho desses agregados, optou-se apenas pela eliminação da fração retida na peneira #19mm. Cabe destacar que a abertura das peneiras brasileiras é levemente diferente da malha sul africana.

As curvas de compactação foram obtidas sem reuso de material, empregando-se o cilindro e o soquete grandes. A energia de compactação aplicada foi a modificada. Anteriormente à realização dos ensaios, as amostras foram secas ao ar, sendo o cimento adicionado, no teor de 1%, considerando as suas massas secas. As misturas foram produzidas de forma manual. Tradicionalmente, a obtenção das curvas de compactação é feita mediante a adição de água. Entretanto, de acordo com o TG2 (SABITA, 2020), no caso das misturas a frio estabilizadas com emulsão, deve ser preparado um fluido composto por 50% de água e 50% de emulsão, devido ao fato do ligante residual também ser considerado um fluido que contribui para o processo de compactação. Já no caso das misturas estabilizadas com espuma de asfalto, o ligante residual deve ser descartado, sendo as curvas de compactação obtidas mediante a adição

de água somente. Para cada teor de fluido adicionado, foi determinado o peso do conjunto (molde + material compactado). Aplicando a equação (13), foi determinado o peso específico aparente seco (γ_{seco}) para cada ponto da curva de compactação. A figura 23 mostra o fluido adicionado às misturas (50% água + 50% emulsão), além do aspecto de uma delas contendo 10% dessa solução. Já na figura 24 é possível visualizar dois pontos da curva de compactação, um no ramo seco (4% de fluido) e outro no ramo úmido (10% de fluido).

$$\gamma_{seco} = \frac{\gamma_{úmido}}{1+FC} \quad (13)$$

Onde:

γ_{seco} = peso específico aparente seco (g/cm^3);

$\gamma_{úmido}$ = peso específico aparente úmido (g/cm^3);

FC = teor de fluido.

Figura 23 - Fluido (à esquerda) e mistura com 10% de fluido adicionado (à direita).



Fonte: arquivo pessoal do autor.

Figura 24 - Ramo seco (à esquerda) e úmido (à direita) da curva de compactação.



Fonte: arquivo pessoal do autor.

5.3.4 Dosagem das misturas

A definição do teor de emulsão de projeto foi feita mediante a realização de ensaios ITS. Em um segundo momento, foram rompidos corpos de prova para verificação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito). A partir desse momento, todos os ensaios do programa experimental foram realizados nas dependências do LAPAV/UFRGS.

5.3.4.1 Resistência à tração indireta (ITS)

Para essa etapa foram moldados corpos de prova em triplicata, levando-se em consideração o teor de emulsão e o tipo de cura realizada. O teor inicial de emulsão foi definido pela curva granulométrica das misturas. A metodologia SABITA (2020) preconiza o acréscimo de quatro teores distintos, buscando otimizar e definir o conteúdo a ser empregado no projeto. Dessa maneira, foram confeccionados 24 corpos de prova para cada mistura, totalizando 48 moldagens. A tabela 9 exibe um resumo sobre essa fase da pesquisa. As misturas foram produzidas de forma manual, buscando-se adotar o mesmo tempo de homogeneização quando cada um dos materiais era adicionado (2 a 3 minutos). As amostras (BGS e RAP) foram secas ao ar e, após a determinação das suas umidades, foi calculada a massa seca da mistura, parâmetro utilizado para determinar as quantidades de cimento e emulsão a serem adicionadas.

Tabela 9 - Corpos de prova moldados para determinação da ITS.

BGS	RAP	Tipo de cura	Teores de emulsão (%)	Nº de corpos de prova
80%	20%	Seca	(Inicial - 0,4)	3
			(Inicial - 0,2)	3
			(Inicial)	3
			(Inicial + 0,2)	3
		Seca + imersão	(Inicial - 0,4)	3
			(Inicial - 0,2)	3
			(Inicial)	3
			(Inicial + 0,2)	3
60%	40%	Seca	(Inicial - 0,4)	3
			(Inicial - 0,2)	3
			(Inicial)	3
			(Inicial + 0,2)	3
		Seca + imersão	(Inicial - 0,4)	3
			(Inicial - 0,2)	3
			(Inicial)	3
			(Inicial + 0,2)	3
Total	-	-	48	

Fonte: elaborado pelo autor.

Importante salientar que nessa etapa não foi feita a diluição da emulsão, sendo esse processo realizado apenas na obtenção das curvas de compactação. Ainda, o primeiro insumo a ser adicionado às misturas foi a água, seguido pelo cimento e, por fim, foi feito o acréscimo da emulsão. Esse padrão foi adotado em todas as fases subsequentes do presente trabalho. A definição da quantidade de água a ser incorporada foi feita respeitando-se o OFC obtido através das curvas de compactação. A equação (14) apresenta essa relação, que leva em conta os teores de fluido, água, emulsão e umidade higroscópica dos agregados.

$$OFC = WC + EC + HM \quad (14)$$

Onde:

OFC = teor de fluido ideal determinado na curva de compactação (%);

WC = teor de água a ser adicionado (%);

EC = teor de emulsão (%);

HM = umidade higroscópica dos agregados (%).

Os corpos de prova foram moldados nas dimensões 150x95mm (diâmetro x altura), com auxílio de um molde tripartido, mediante o emprego da compactação vibratória. Nessa etapa, foi utilizado um martelo demolidor da marca Bosch, modelo GSH 500, com uma potência nominal de 1100 W e uma energia de impacto de 7,5 J por golpe, sendo acoplada na sua extremidade uma ponteira adaptada. Inicialmente, os corpos de prova foram confeccionados em duas camadas. Todavia, foi observado que o $\gamma_{dm\acute{a}x}$ não estava sendo alcançado, mesmo com o incremento no tempo de compactação aplicado. Dessa forma, em um segundo momento, os corpos de prova passaram a ser moldados em três camadas. Vale destacar que essas recomendações constam no TG2 (SABITA, 2020). Durante a moldagem, o controle do tempo de compactação foi feito mediante a aferição das alturas. Maiores detalhes sobre esses pontos específicos serão discutidos no capítulo de apresentação e análise dos resultados. Por fim, cabe destacar que o processo de escarificação foi realizado, buscando promover uma melhor aderência e continuidade entre as camadas. Com relação a produtividade, destaca-se que foi possível confeccionar seis corpos de prova em cada dia de moldagem. A figura 25 mostra o molde tripartido, um detalhe da ponteira adaptada e uma visão geral do pórtico e do martelo demolidor empregados na compactação dos corpos de prova ITS.

Figura 25 - Molde tripartido (à esquerda acima), detalhe da ponteira (à esquerda abaixo) e visão geral do pórtico e do martelo demolidor (à direita).



Fonte: arquivo pessoal do autor.

Após a compactação, os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura controlada conforme a descrição apresentada a seguir:

- a) Finalizada a remoção dos corpos de prova de seus respectivos moldes, eles foram identificados e colocados em estufa a uma temperatura de 40°C por um período mínimo de 72 horas;
- b) Depois das 72 horas, os corpos de prova foram retirados da estufa e pesados, sendo suas massas individuais registradas;
- c) Todos os corpos de prova foram recolocados na estufa a 40°C por mais quatro horas e, passado esse período, o exercício de pesagem foi repetido. Como a massa de todos os corpos de prova apresentou uma diferença inferior a dez gramas, ou seja, praticamente foi atingida a constância de massa, eles foram removidos da estufa;
- d) Os corpos de prova foram então colocados sobre uma bancada até que fosse alcançada a temperatura de 25°C. Após o resfriamento ser realizado por um período mínimo de 20 horas, foram determinadas as densidades aparentes secas de cada corpo de prova;
- e) Foram excluídos das análises todos os corpos de prova que apresentaram uma densidade aparente individual superior a $\pm 2,5\%$ da média obtida para o conjunto, sendo considerado como conjunto os seis corpos de prova moldados para cada teor de emulsão incorporado;
- f) Feita a análise estatística, os corpos de prova não submetidos a imersão foram rompidos. Já a outra metade dos corpos de prova (três para cada teor de emulsão) foram colocados em um banho de imersão com água a 25°C, por um período de 24 horas. Após a imersão, os corpos de prova foram removidos da água, suas superfícies foram secas e o ensaio ITS realizado imediatamente.

A figura 26 ilustra dois conjuntos de corpos de prova moldados para o ensaio de ITS. Como é possível visualizar, um dos grupos se encontra imerso em água enquanto o outro, submetido ao processo de cura controlada sem imersão, está prestes a ser rompido.

Figura 26 - Corpos de prova 150x95mm em imersão (à esquerda) e logo após concluída a cura controlada sem imersão (à direita).



Fonte: arquivo pessoal do autor.

O ensaio para determinação da ITS foi executado de acordo com a normativa DNIT-ME 136 (DNIT, 2018), desenvolvido originalmente para misturas asfálticas. Anteriormente à realização do experimento, os corpos de prova foram medidos (diâmetro e altura) e, após sua colocação e ajuste entre os frisos metálicos, foi aplicada uma carga vertical de compressão a uma taxa de deslocamento constante de 0,8 mm/s. Verificada a ruptura do corpo de prova, a aplicação da carga era interrompida. Considerando a carga de ruptura aplicada, o parâmetro ITS foi calculado mediante a aplicação da equação (15):

$$ITS = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (15)$$

Onde:

ITS = resistência à tração indireta (MPa);

F = carga de ruptura (N);

D = diâmetro do corpo de prova (cm);

H = altura do corpo de prova (cm).

A figura 27 exhibe a prensa utilizada nos ensaios ITS, inclusive com um corpo de prova já posicionado para rompimento. Nessa mesma ilustração, são apresentados dois corpos de prova já rompidos, sendo possível visualizar seus planos de ruptura.

Figura 27 - Prensa utilizada nos ensaios ITS (à esquerda) e corpos de prova rompidos (à direita).



Fonte: arquivo pessoal do autor.

5.3.4.2 Resistência ao cisalhamento

A fim de concluir a dosagem, foram realizados ensaios triaxiais de carregamento monotônico para determinar os parâmetros de cisalhamento das misturas. Nesta etapa, foi adicionado apenas um teor de emulsão, definido em função dos resultados de ITS obtidos anteriormente. Foram confeccionados corpos de prova em duplicata para cada σ_3 aplicada, resultando em um total de dez corpos de prova para cada mistura, totalizando vinte moldagens. Importante destacar que, nessa fase da dosagem, a metodologia SABITA (2020) estabelece que os corpos de prova tenham dimensões 150x300mm (diâmetro x altura). No entanto, devido à inexistência de laboratórios vinculados ao PPGCI/UFRGS capazes de ensaiar corpos de prova com essas dimensões, optou-se por moldá-los nas dimensões 100x200mm. Outro ponto a ser salientado diz respeito às σ_3 atuantes. Idealmente, o TG2 estabelece que a maior σ_3 praticada seja de 200 kPa. Contudo, a câmara triaxial disponível para realização dos ensaios foi dimensionada para suportar justamente essa tensão. Sendo assim, visando não levar o equipamento a uma situação limite e, ainda, atuando em prol da segurança, foi decidido aplicar uma σ_3 de 150 kPa. A tabela 10 exhibe um resumo contendo as principais informações sobre essa etapa de dosagem.

Tabela 10 - Corpos de prova moldados para determinação da resistência ao cisalhamento (c e ϕ).

BGS	RAP	Tipo de cura	Teor de emulsão (%)	σ_3 (kPa)	Nº de corpos de prova
80%	20%	Seca	Definido pela ITS	0	2
				50	2
				100	2
				150*	2
		Seca + imersão	Definido pela ITS	100	2
60%	40%	Seca	Definido pela ITS	0	2
				50	2
				100	2
				150*	2
		Seca + imersão	Definido pela ITS	100	2
Total	-	-	-	-	20

(*) O TG2 preconiza a aplicação de uma σ_3 de 200 kPa. Entretanto, devido à limitação da câmara triaxial do equipamento, foi aplicada uma σ_3 de 150 kPa.

Fonte: elaborado pelo autor.

As misturas foram produzidas de maneira similar à etapa de ITS, ou seja, de forma manual. As amostras, tanto de BGS quanto de RAP, foram secas ao ar. Cabe salientar que as quantidades de cimento (1%) e emulsão adicionadas sempre foram determinadas levando em consideração o peso seco das misturas. A ordem de acréscimo dos insumos respeitou a sequência apresentada anteriormente, ou seja, primeiramente foi adicionada a água, depois o cimento e, por último, a emulsão (não diluída). O teor de água incorporado respeitou o OFC.

A moldagem dos corpos de prova (100x200mm) foi realizada com auxílio de um molde tripartido, por meio da compactação vibratória. Nesse estágio, foi utilizado um martelo demolidor mais pesado quando comparado ao empregado na etapa de ITS. A ferramenta, da marca Bosch, modelo GSH 11 VC, possui uma potência nominal de 1700 W (o anterior era 1100 W) e uma energia de impacto de 23 J por golpe (o anterior era 7,5 J). Manteve-se acoplada à sua extremidade a mesma ponteira adaptada. Os corpos de prova foram confeccionados, todos, em cinco camadas, sendo realizado o processo de escarificação naquela já compactada. Não houve maiores dificuldades para que o $\gamma_{dm\acute{a}x}$ fosse atingido. O controle do tempo de compactação foi feito mediante a aferição da altura de cada uma das camadas. Por fim, cabe destacar que o novo martelo demolidor foi posicionado e ajustado no mesmo pórtico utilizado na confecção dos corpos de prova ITS. Quanto a produção, em cada dia de moldagem foi

possível compactar quatro corpos de prova. Finalizada a moldagem, os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura controlada de acordo com as diretrizes abaixo:

- a) Os corpos de prova foram deixados em seus respectivos moldes durante a noite, cobertos com um pano úmido;
- b) Na manhã seguinte, após serem removidos dos moldes, os corpos de prova foram identificados e suas densidades aparentes determinadas;
- c) Os corpos de prova foram então colocados em estufa a uma temperatura de 40°C por um período de 8 horas. Passado esse intervalo, eles foram removidos da estufa, colocados no interior de sacos plásticos vedados e recolocados na estufa a 40°C por um período de 48 horas;
- d) Depois das 48 horas, dois corpos de prova de cada mistura foram retirados dos sacos plásticos e colocados em um banho de imersão a 25°C por um prazo de 24 horas. Foi tomado o cuidado para que os corpos de prova ficassem submersos com pelo menos 25 mm de água cobrindo sua face superior;
- e) Os corpos de prova restantes (oito para cada mistura) foram colocados em sacos plásticos novos (secos), vedados e deixados sobre uma bancada até que fosse alcançada a temperatura de 25°C. Após o resfriamento ser promovido por um período mínimo de 12 horas, os corpos de prova foram removidos dos sacos plásticos, pesados e ensaiados imediatamente;
- f) Os corpos de prova submetidos a imersão, após o período de 24 horas, tiveram suas superfícies secas e, logo após, foram pesados e rompidos imediatamente;
- g) Foram calculadas a média e o desvio padrão das densidades aparentes obtidas (alínea b) para o conjunto de dez corpos de prova moldados para cada mistura. Caso algum resultado estivesse fora do intervalo de aceitação, o que não ocorreu, o corpo de prova teria que ser descartado. Em havendo mais de duas exclusões, um novo conjunto de dez corpos de prova deveria ter sido confeccionado.

A figura 28 exhibe alguns corpos de prova moldados para essa fase da pesquisa, sendo possível visualizar o momento em que dois deles se encontram em imersão, além de um conjunto cujo processo de cura controlada sem imersão já foi finalizado.

Figura 28 - Corpos de prova 100x200mm em imersão (à esquerda) e logo após a conclusão da cura controlada sem imersão (à direita).



Fonte: arquivo pessoal do autor.

O Brasil não possui normativa própria balizando a execução de ensaios triaxiais monotônicos. Diversas pesquisas que já realizaram esse tipo de experimento citam a norma ASTM-D2850 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007). Todavia, o TG2 (SABITA, 2020) apresenta, em seu apêndice B, uma descrição detalhada sobre como deve ser feita a determinação das propriedades de cisalhamento de materiais tipo BSM. Sendo assim, foram seguidas essas recomendações. Os ensaios foram realizados em uma máquina hidráulica, do tipo MTS, equipada com um sistema de aquisição de dados capaz de medir as cargas e os deslocamentos aplicados, configurada da seguinte maneira: taxa de aquisição de dados ajustada para frequência de 10 Hz e taxa de deslocamento constante de 3 mm/min. O carregamento vertical foi aplicado até o momento da ruptura do corpo de prova ou, como situação limite, foi estabelecida uma deformação de 6% (equivalente a 12mm). As σ_3 aplicadas foram 0, 50, 100 e 150 kPa. Após a realização do ensaio, todos os corpos de prova tiveram suas umidades determinadas. Considerando a carga de ruptura bem como o conceito das envoltórias de Mohr-Coulomb exposto anteriormente, foram calculados os parâmetros de cisalhamento. Primeiramente, foram plotadas as tensões de ruptura totais ($\sigma_{1,f}$) no eixo vertical *versus* as tensões de confinamento (σ_3) no eixo horizontal para todos os corpos de prova não submetidos à imersão. Em um segundo momento, foi selecionada a linha reta que proporcionou o melhor ajuste para os pontos constantes no gráfico, também denominada envoltória de ruptura. De acordo com o modelo obtido, foram determinados os seguintes parâmetros: A – que corresponde a inclinação da reta de melhor ajuste e B – ponto no qual a envoltória de ruptura

toca o eixo vertical. A determinação da coesão e do ângulo de atrito foi feita de acordo com as equações (16) e (17):

$$\phi = \text{sen}^{-1} \cdot \frac{(A-1)}{(A+1)} \quad (16)$$

$$c = B \cdot \frac{(1-\text{sen } \phi)}{(2 \cdot \cos \phi)} \quad (17)$$

Onde:

ϕ = ângulo de atrito interno da mistura (°);

c = coesão (kPa);

A = declividade da linha reta que representa a envoltória de ruptura;

B = ponto em que envoltória de ruptura intercepta o eixo vertical.

A coesão retida (RetC), definida como a porcentagem de coesão residual do material tipo BSM após sua exposição à umidade, foi determinada pela equação (18). Vale destacar que os corpos de prova submetidos à imersão foram rompidos aplicando-se uma σ_3 de 100 kPa.

$$\text{RetC} = \frac{\text{coesão após imersão } (\sigma_3=100 \text{ kPa})}{\text{coesão seca } (\sigma_3=100 \text{ kPa})} = \frac{(\sigma_{1,f,\text{após imersão}}-100)}{(\sigma_{1,f,\text{seca}}-100)} \cdot 100 \quad (18)$$

Onde:

RetC = coesão retida (%);

$\sigma_{1, f, \text{ após imersão}}$ = tensão de ruptura aplicada no corpo de prova submetido à imersão rompido com uma σ_3 de 100 kPa;

$\sigma_{1, f, \text{ seca}}$ = tensão de ruptura (lida a partir da envoltória) dos corpos de prova não submetidos à imersão para uma σ_3 de 100 kPa.

A figura 29 apresenta o equipamento MTS utilizado na execução dos ensaios, inclusive com a câmara triaxial devidamente posicionada. Nela, também é possível visualizar em detalhe um corpo de prova com uma σ_3 sendo aplicada.

Figura 29 - Equipamento MTS (à esquerda) e detalhe da σ_3 sendo aplicada em um corpo de prova (à direita).



Fonte: arquivo pessoal do autor.

5.3.5 Avaliação do tempo de cura no módulo de resiliência das misturas

Concluída a dosagem das misturas, foram confeccionados corpos de prova com dimensões 150x300mm para realização de ensaios triaxiais de módulo de resiliência. Nesta etapa, foi adicionado apenas o teor de emulsão de projeto, definido em função dos resultados anteriores (ITS e cisalhamento). Foram compactados corpos de prova em duplicata para cada mistura, levando em consideração ainda os diferentes tempos de cura avaliados, totalizando oito moldagens. A tabela 11 exibe uma síntese dessa fase da pesquisa. Quanto às condições de cura, cabe esclarecer que a denominada cura controlada corresponde ao mesmo processo apresentado na etapa de cisalhamento, ou seja, os corpos de prova 150x300mm foram submetidos às mesmas condições de cura dos corpos de prova 100x200mm moldados para determinação da coesão e do ϕ . Finalizado o processo de cura controlada, os corpos de prova foram removidos dos sacos plásticos e colocados sobre uma bancada em uma sala com temperatura média de 25°C, sendo ali mantidos até o décimo quarto dia após a moldagem, quando foram ensaiados. Esse processo foi denominado de cura estendida. Importante destacar que, para realização dessa bateria de testes, nenhum corpo de prova foi submetido à imersão.

Tabela 11 - Corpos de prova moldados para avaliação do tempo de cura no MR.

BGS	RAP	Tipo de cura	Teor de emulsão (%)	Nº de corpos de prova
80%	20%	Controlada (SABITA, 2020)	Teor de projeto	2
		Estendida (14 dias)	Teor de projeto	2
60%	40%	Controlada (SABITA, 2020)	Teor de projeto	2
		Estendida (14 dias)	Teor de projeto	2
Total		-	-	8

Fonte: elaborado pelo autor.

As misturas foram produzidas de modo similar às etapas de ITS e cisalhamento, ou seja, de forma manual e respeitando a sequência de adição dos insumos já explicitada. Cabe destacar que a emulsão foi acrescentada em sua configuração original, ou seja, sem diluição. Todavia, cabe aqui uma observação: nessa fase, foram eliminadas apenas as partículas retidas na peneira de #38,1mm (1 ½”), seguindo as orientações constantes na norma DNIT 134/2018-ME (DNIT, 2018). Não foi feito nenhum tipo de reposição de agregados.

A moldagem dos corpos de prova (150x300mm) foi realizada com auxílio de dois moldes, sendo um tripartido e outro de parede contínua. A compactação foi do tipo vibratória, com emprego do mesmo martelo demolidor utilizado na etapa de cisalhamento. Os corpos de prova foram confeccionados em dez camadas e o processo de escarificação foi realizado. Nessa bateria de moldagens, mais uma vez, não foram observadas maiores dificuldades para que o $\gamma_{dm\acute{a}x}$ fosse alcançado. O tempo de compactação foi controlado mediante a aferição das alturas de cada camada. Em cada dia de moldagem, foi possível compactar dois corpos de prova.

A figura 30 apresenta uma visão geral do processo de compactação com um corpo de prova 150x300mm recém confeccionado no molde de parede contínua. Na mesma ilustração, também é exibido o processo de extrusão, realizado com auxílio de um macaco hidráulico, além da aparência de um corpo de prova após a desmoldagem. Vale destacar que os corpos de prova foram removidos dos moldes apenas no dia posterior à compactação.

Figura 30 - Compactação no molde de parede contínua (à esquerda), processo de extrusão (ao centro) e aparência de um corpo de prova 150x300mm (à direita).



Fonte: arquivo pessoal do autor.

Os ensaios triaxiais de módulo de resiliência foram executados de acordo com a normativa DNIT 134/2018-ME (DNIT, 2018). Depois de posicionar o corpo de prova devidamente envolvido por uma membrana de borracha dentro da câmara triaxial, os dois transdutores de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*), localizados na parte interna da câmara, foram ajustados e, após essa etapa, o ensaio foi iniciado. Primeiramente, foram desferidos 1500 ciclos de carga relativos à etapa de condicionamento. Após, para cada um dos dezoito pares de tensão, mais cem carregamentos cíclicos. A frequência do carregamento foi configurada para 1 Hz e, para cada par de tensão, o sistema de aquisição de dados fez o registro das últimas cinco repetições de carga. A figura 31 ilustra o momento em que a membrana de borracha está sendo colocada no entorno de um corpo de prova momentos antes do ensaio ser iniciado. Nela, também é exibida uma visão geral do experimento.

Figura 31 - Colocação da membrana de borracha (à esquerda) e ensaio triaxial de módulo de resiliência em andamento (à direita).



Fonte: arquivo pessoal do autor.

5.3.6 Verificação adicional da dosagem das misturas

Conforme já relatado, na etapa de moldagem dos corpos de prova para determinação da ITS, houve problemas para atingir o $\gamma_{dm\acute{a}x}$ estabelecido por meio das curvas de compactação das misturas. Isso ocorreu devido ao fato de o martelo demolidor empregado não promover potência e energia suficientes para que maiores densidades fossem alcançadas. Dessa forma, considerando que a compactação dos corpos de prova 150x300mm foi realizada sem maiores problemas, mediante o emprego de um martelo demolidor mais potente e pesado e, ainda, considerando que os $\gamma_{dm\acute{a}x}$ foram obtidos, o autor achou interessante promover uma etapa de verificação adicional da dosagem das misturas (ao menos parcial). Isso foi feito mediante a realização de novos ensaios para determinação da ITS.

Os corpos de prova 150x300mm, com auxílio de uma serra circular de corte, foram divididos em três partes. Sendo assim, foram produzidos “novos” corpos de prova (24 no total), correspondentes ao terço superior, médio e inferior dos corpos de prova originais, com dimensões aproximadas de 150x100mm. De uma maneira geral, o procedimento de serragem realizado pôde ser considerado satisfatório. Um ponto que merece destaque é que, nos casos em que o agregado graúdo estava localizado próximo da borda, no momento da passagem da serra, houve o seu desprendimento, deixando a superfície do “novo” corpo de prova com imperfeições. Essa situação foi presenciada em alguns casos. Não foi observada a promoção de trincas e tampouco a ruptura dos “novos” corpos de prova no momento do corte. Importante destacar que a serragem foi realizada nos mesmos corpos de prova submetidos anteriormente aos ensaios triaxiais de módulo de resiliência. A figura 32 apresenta a serra circular utilizada, bem como a aparência dos “novos” corpos de prova após o corte ser concluído.

Figura 32 - Serra circular (à esquerda) e aspecto dos corpos de prova após o corte ser concluído (à direita).



Fonte: arquivo pessoal do autor.

Considerando que os “novos” corpos de prova foram derivados de diferentes regiões (terço superior, médio e inferior), foi viável avaliar a distribuição e a variação da ITS ao longo do perfil dos corpos de prova originais. Ainda, levando em consideração os parâmetros de dosagem da SABITA (2020), foi possível verificar se os teores de emulsão selecionados anteriormente a partir dos resultados obtidos na etapa de ITS promoveram, de fato, o desempenho mínimo preconizado pelo método. Na tabela 12 é possível visualizar um resumo dessa fase da pesquisa.

Tabela 12 - Corpos de prova 150x100mm obtidos a partir do processo de serragem.

BGS	RAP	Região do corpo de prova original	Teor de emulsão (%)	Nº de corpos de prova
80%	20%	Terço superior	Teor de projeto	4
		Terço médio	Teor de projeto	4
		Terço inferior	Teor de projeto	4
60%	40%	Terço superior	Teor de projeto	4
		Terço médio	Teor de projeto	4
		Terço inferior	Teor de projeto	4
Total	-	-	-	24

Fonte: elaborado pelo autor.

Após o processo de serragem, os corpos de prova 150x100mm foram colocados em uma estufa a 40°C por um período mínimo de 24 horas, a fim de promover a secagem do conjunto. Isso foi necessário pois, considerando que o processo de corte utiliza água, a superfície dos corpos de prova ficou umedecida. Nessa etapa, os corpos de prova não foram submetidos à imersão.

Também foi feita a determinação do índice de vazios de ar ($e\%$) de acordo com o especificado pela normativa ASTM D3203 (2017) para misturas com $e\%$ superior a 10%. Dessa forma, foi possível relacionar os parâmetros $e\%$ versus ITS e, ainda, mapear suas distribuições dentro da estrutura de um corpo de prova compactado de forma vibratória. Para determinação do $e\%$ foi necessário conhecer a densidade máxima medida (G_{mm}) das duas misturas, a qual foi calculada aplicando-se a norma DNIT 427/2020-ME. A massa mínima das amostras foi determinada em função do tamanho máximo nominal do agregado que, nesse caso, era de #38,1mm (1 ½”). Sendo assim, para cada mistura, foi preparada e ensaiada uma amostra de 5 kg. Vale citar que o experimento para estabelecer a G_{mm} é comumente conhecido como método de ensaio Rice. As equações (19) e (20) apresentam, respectivamente, como foi feita a determinação dos

parâmetros G_{mm} e $e\%$. A figura 33 apresenta o equipamento e as amostras de uma das misturas utilizadas na execução do ensaio Rice. Como a massa total preparada foi de 5 kg e, considerando que o frasco empregado no experimento deve ter no máximo $2/3$ do seu volume preenchido com material, a amostra total foi dividida e ensaiada em quatro partes.

$$G_{mm} = \frac{A}{A+B-C} \quad (19)$$

$$e\% = 100. \left(1 - \left(\frac{\gamma_{ap.}}{G_{mm}}\right)\right) \quad (20)$$

Onde:

G_{mm} = densidade máxima medida (g/cm^3);

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

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

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

$e\%$ = índice de vazios de ar (%);

$\gamma_{ap.}$ = peso específico aparente (g/cm^3).

Figura 33 - Equipamento (à esquerda) e amostras (à direita) empregadas na execução do ensaio Rice.



Fonte: arquivo pessoal do autor.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no programa experimental da presente pesquisa. Sempre que possível, eles foram comparados com dados obtidos por outros autores, sendo realizados comentários e colocações acerca do tema discutido.

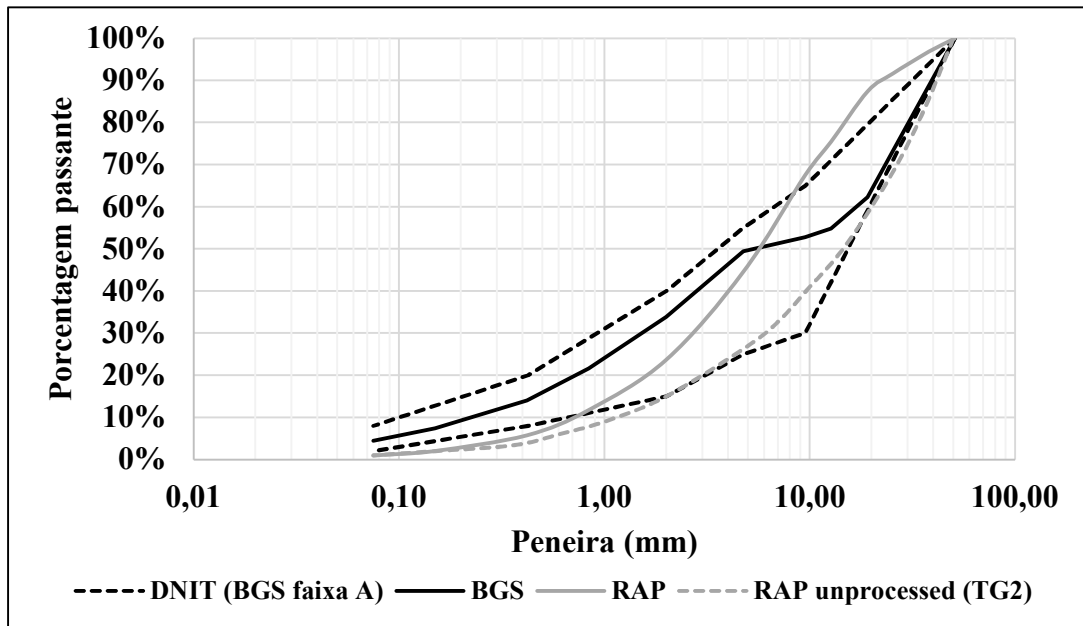
6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS (RAP E BGS)

Este item exhibe os resultados obtidos a partir da caracterização dos materiais coletados em campo. Primeiramente, são apresentadas as curvas granulométricas do RAP e da BGS e, em um segundo momento, os demais ensaios de caracterização realizados. Mais uma vez, cabe destacar que apenas a granulometria dos materiais foi determinada nas dependências da UFRGS, sendo os demais ensaios disponibilizados pelo fornecedor da BGS.

6.1.1 Análise granulométrica (RAP e BGS)

A figura 34 ilustra as curvas granulométricas obtidas para as amostras de BGS e RAP, a partir da qual é possível realizar algumas considerações. Primeiramente, cabe destacar que a granulometria da BGS se encontra dentro dos limites da faixa A, de acordo com o estabelecido pela norma DNIT 141/2010-ES (DNIT, 2010), sendo o seu uso indicado para tráfegos com $N > 5 \times 10^6$ (metodologia USACE). Vale lembrar que a faixa A possui a composição mais graúda dentre todas as granulometrias preconizadas pela especificação de serviço supracitada. Um segundo ponto que merece ser salientado diz respeito ao RAP, sendo possível perceber que aquele empregado na presente pesquisa possui uma granulometria significativamente mais fina quando comparado ao “*RAP unprocessed*” citado pelo TG2 (SABITA, 2020). Considerando que não houve nenhum tipo de beneficiamento no RAP coletado visando promover a quebra de seus agregados, é possível inferir que no momento da passagem da máquina fresadora em campo, a mesma tenha operado a baixíssimas velocidades, promovendo uma trituração considerável no RAP. Por fim, comparando-se as curvas granulométricas da BGS e do RAP, percebe-se que ambas se cruzam em determinado momento, mais especificamente na abertura de peneira #6mm (aproximadamente). Para aberturas maiores, a granulometria do RAP é notavelmente mais fina e, para malhas menores, a BGS passa a possuir essa característica.

Figura 34 - Curvas granulométricas dos materiais coletados em campo.



Fonte: elaborado pelo autor.

6.1.2 Outros ensaios de caracterização (BGS)

A tabela 13 apresenta os resultados dos demais ensaios de caracterização realizados pelo próprio fornecedor no agregado tipo BGS. Sua curva de compactação será apresentada em momento posterior, a fim de avaliá-la de forma conjunta com as curvas obtidas para as misturas 80%BGS_20%RAP e 60%BGS_40%RAP. Observando as informações exibidas na tabela, destaca-se que todos os resultados alcançados pela BGS cumpriram os requisitos estabelecidos na especificação de serviço DNIT 141/2010-ES, que trata sobre bases estabilizadas granulometricamente. Os dados obtidos indicam que o material coletado possui procedência e qualidade satisfatórias.

Nesse momento, é importante fazer uma consideração. O único ensaio de caracterização realizado no RAP foi a determinação da sua curva granulométrica. O motivo da não execução de um maior número de experimentos é que o presente trabalho estuda a dosagem de misturas a frio. Isso pressupõe que o RAP, para fins de dosagem e determinação do teor de emulsão de projeto, seja considerado simplesmente como um “*black rock*” não sendo necessário, portanto, um estudo mais detalhado das propriedades do ligante asfáltico a ele incorporado como, por exemplo, a determinação do seu teor ou da parcela que se encontra oxidada ou, ainda, eventualmente ativa. Caso a presente pesquisa abordasse a dosagem de misturas a quente ou mornas com incorporação de RAP, a situação seria diferente e ensaios adicionais para

caracterização desse agregado seriam necessários. Levando-se em conta que a emulsão empregada atua na reativação das propriedades do ligante asfáltico oxidado, a consideração do RAP como “*black rock*” para fins exclusivos de dosagem não significa que esse material não afetará as demais propriedades avaliadas na presente pesquisa.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de caracterização da BGS.

Propriedade	Normativa do ensaio	Resultado	Especificação (DNIT 141/2010-ES)
ISC	NBR 9895/17	176%	≥ 80%
Expansão	NBR 9895/17	0%	≤ 0,5%
LL	DNER-ME 082/94	NP	≤ 25%
IP	DNER-ME 082/94	NP	≤ 6%
Equiv. de areia	DNER-ME 054/97	63,3%	> 30%
Absorção	DNER-ME 195/97	0,6%	-
Abrasão “Los Angeles”	DNER-ME 035/98	21%	≤ 55%
Índice de forma	DNIT-ME 424/20	0,8%	-

Fonte: elaborado pelo autor.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DA EMULSÃO ASFÁLTICA

Este tópico apresenta os resultados dos ensaios realizados para caracterização da emulsão asfáltica. Vale destacar que essa etapa foi executada inteiramente no laboratório do próprio fornecedor, não sendo nenhum dos experimentos realizados nas dependências da UFRGS.

A tabela 14 exhibe uma síntese com os resultados obtidos. É possível observar que todas as propriedades da emulsão ficaram dentro dos parâmetros de aceitação estabelecidos pela resolução N° 36 da Agência Nacional do Petróleo (ANP), que regulamenta as especificações das emulsões asfálticas utilizadas na pavimentação a nível nacional. Avaliando-se a referida resolução, é possível deduzir que a emulsão empregada é do tipo RL1C-E, tratando-se de uma emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos de ruptura lenta. ABEDA (2001) *apud* David (2006) refere que as emulsões do tipo RL podem ser misturadas com agregados que contenham finos, pois sua ruptura ocorre de forma mais lenta. A autora também destaca que nas emulsões do tipo RR, sua ruptura acontece de maneira imediata, logo após o seu contato com os agregados e, no caso das emulsões do tipo RM, apesar de o tempo de ruptura

ser um pouco mais longo, seu uso é indicado para misturas de agregados que, praticamente, não contenham finos.

Por fim, destaca-se que diversos outros autores já empregaram emulsões do tipo RL em suas pesquisas com misturas a frio (DAVID, 2006; TANSKI, 2016; YANG *et al.*, 2021; MENESES, 2022; OROSA *et al.*, 2022a; OROSA *et al.* 2022b).

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de caracterização da emulsão asfáltica.

Propriedade	Normativa do ensaio	Resultado	Especificação (resolução ANP N° 36)	
			Mínimo	Máximo
Viscosidade Saybolt Furol (50°C)	NBR 14491/07	25 s	-	70 s
Sedimentação (5 dias)	NBR 6570/16	1,6%	-	5%
Peneiração (retido #0,84mm)	NBR 14393/12	0,01%	-	0,1%
Carga de partícula	NBR 6567/15	Positiva	Positiva	
Resíduo seco	NBR 14376/19	60,5%	60%	-
pH	NBR 6299/12	4	-	6,5

Fonte: elaborado pelo autor.

6.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS

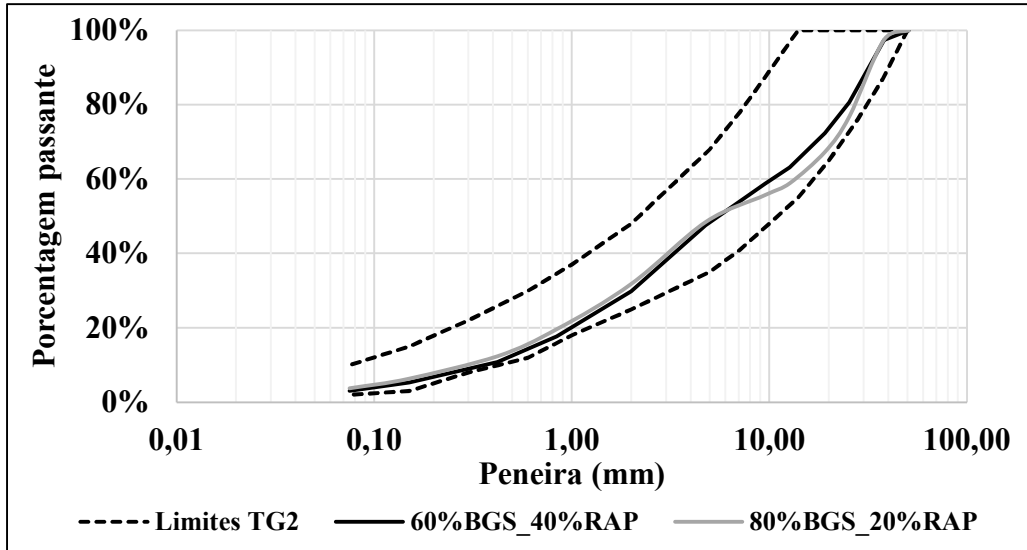
Esta seção expõe os resultados dos ensaios de caracterização efetuados nas duas misturas estudadas, as quais foram produzidas considerando a incorporação de dois teores de RAP e identificadas da seguinte maneira: 80%BGS_20%RAP e 60%BGS_40%RAP. Inicialmente, são apresentadas suas granulometrias e, posteriormente, as curvas de compactação. Essa etapa da pesquisa foi realizada nas dependências da UFRGS, mais especificamente no Laboratório de Geotecnologia (LAGEOtec).

6.3.1 Granulometria das misturas

As curvas granulométricas das duas misturas estudadas são apresentadas na figura 35. Nela, também é possível observar a faixa granulométrica recomendada para reciclagem de materiais com incorporação de emulsão asfáltica de acordo com o TG2 (SABITA, 2020). Considerando que as granulometrias de ambas as misturas se encontram dentro dos limites propostos, não foi

necessária a adição de nenhum outro tipo de agregado, sendo dispensável o processo de estabilização granulométrica.

Figura 35 - Curvas granulométricas das misturas.



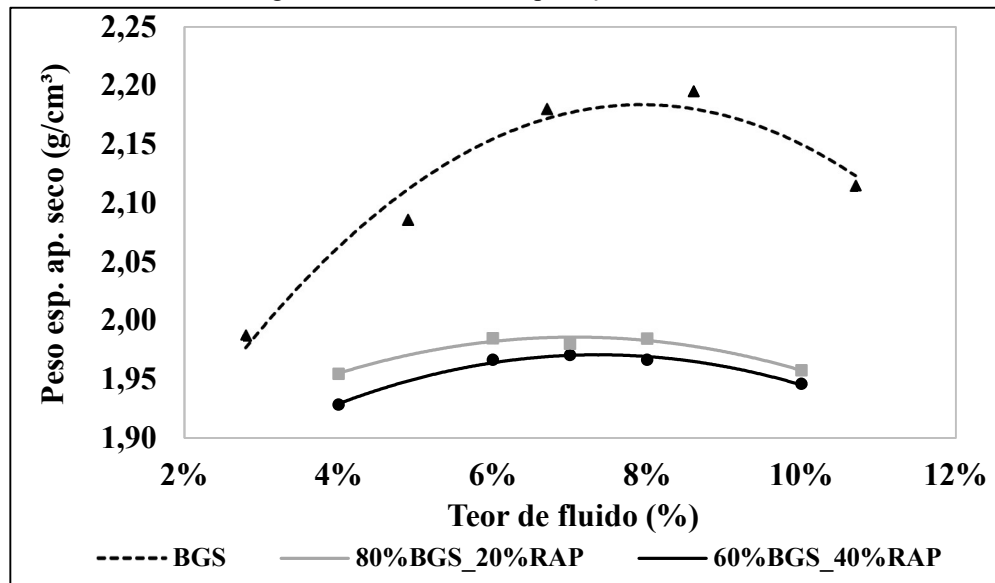
Fonte: elaborado pelo autor.

Pela análise da figura 35 é possível observar que a mistura 60%BGS_40%RAP possui, para as peneiras de maior abertura, uma granulometria mais fina. Todavia, a partir da malha #6mm, a mistura 80%BGS_20%RAP passa a apresentar essa característica. De uma maneira geral, as granulometrias de ambas as misturas podem ser consideradas bastante similares. Conforme abordado anteriormente, o teor inicial de emulsão a ser incorporado é definido em função da granulometria dos materiais e, considerando que as metodologias Wirtgen (2012) e SABITA (2020) especificam as mesmas diretrizes, esse conteúdo foi determinado a partir da tabela 4. Devido ao fato das misturas 60%BGS_40%RAP e 80%BGS_20%RAP apresentarem uma fração passante na peneira #4,75mm inferior a 50% (47% e 48% respectivamente) e, ainda, considerando que o teor de finos (passante #0,075mm) obtido para ambas as misturas foi menor do que 4%, o teor inicial de emulsão a ser adicionado foi definido como sendo **3,3%**.

6.3.2 Ensaio de compactação

As curvas de compactação obtidas para as duas misturas estudadas são exibidas na figura 36. Para fins de comparação, também foi inserida a curva do agregado tipo BGS.

Figura 36 - Curvas de compactação das misturas.



Fonte: elaborado pelo autor.

As informações contidas na figura 36 permitem algumas considerações. Em um primeiro momento, destaca-se que a incorporação de RAP promove uma redução no $\gamma_{dm\acute{a}x.}$ e na $w_{\acute{o}t.}$ dos materiais. É possível verificar que quanto maior o teor de RAP incorporado, maior a redução observada no $\gamma_{dm\acute{a}x.}$. Esse comportamento já foi relatado por outros autores como Specht *et al.* (2013) e Fedrigo (2015), dentre outros. Com relação ao parâmetro OFC, a variação nos teores de RAP adicionados não promoveu uma influência significativa. Isso talvez possa ser explicado pelo fato de as curvas granulométricas de ambas as misturas exibirem considerável similaridade, com um conteúdo de finos praticamente idêntico (aproximadamente 3%), fazendo com que a adição de um mesmo teor de fluido promova a máxima densificação dos materiais.

Baseado nos resultados dos ensaios de granulometria e compactação, foi possível definir os teores de emulsão a serem acrescentados às misturas na etapa de dosagem bem como os seus parâmetros de moldagem. A tabela 15 apresenta uma síntese dessas definições.

Fedrigo (2015) obteve um $\gamma_{dm\acute{a}x.}$ de 2,075 g/cm³ para uma mistura composta por 20% de RAP e 80% de BGS. Já para combinação contendo 50% de RAP e 50% de BGS, o mesmo autor alcançou um $\gamma_{dm\acute{a}x.}$ de 2,06 g/cm³. Dentre os diversos estudos lidos e pesquisados, as densidades máximas obtidas variaram entre 1,845 g/cm³ (GUATIMOSIM, 2015) e 2,168 g/cm³ (KUCHIISHI, 2019; SILVA, 2019). Esses dados corroboram que os parâmetros de compactação obtidos na presente pesquisa se encontram dentro de valores aceitáveis.

Tabela 15 - Parâmetros obtidos na etapa de caracterização das misturas.

Mistura	Parâmetros de moldagem		Teores adicionados	
	OFC	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$	Emulsão	Água
80%BGS_20%RAP	7%	1,985 g/cm ³	2,9%	4,1%
			3,1%	3,9%
			3,3% (inicial)	3,7%
			3,5%	3,5%
60%BGS_40%RAP	7,4%	1,970 g/cm ³	2,9%	4,5%
			3,1%	4,3%
			3,3% (inicial)	4,1%
			3,5%	3,9%
Agregado tipo BGS	8% (w _{ót.})	2,18 g/cm ³	-	-

Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim, cabe destacar que a não reposição da parcela de agregados retida na peneira de abertura #19mm promoveu uma redução considerável na densidade máxima das misturas quando comparadas ao agregado BGS, cujo $\gamma_{dm\acute{a}x.}$ determinado pelo fornecedor foi de 2,18 g/cm³. Considerando que as partículas maiores são mais pesadas, caso a substituição tivesse sido realizada, é bastante presumível que as densidades atingidas fossem majoradas.

6.4 DOSAGEM DAS MISTURAS

Este item apresenta os resultados obtidos na etapa de dosagem das misturas. Primeiramente, são discutidos os diferentes aspectos que influenciaram o parâmetro ITS e, em um segundo momento, são feitas análises sobre os parâmetros de cisalhamento alcançados.

6.4.1 Resistência à tração indireta (ITS)

Foram feitas uma série de avaliações sobre os aspectos que influenciaram o desempenho das misturas com relação ao parâmetro ITS. Essas análises são discutidas a seguir.

6.4.1.1 Considerações sobre o processo de compactação

As tabelas 16 e 17 resumem, respectivamente, as características dos corpos de prova moldados para determinação da ITS. Cabe destacar que o controle estatístico apresentado, cujo intervalo

de aceitação está compreendido entre o valor médio das densidades +/- 2,5%, considerando o conjunto de seis corpos de prova moldados para cada teor de emulsão, se encontra especificado no TG2 (SABITA, 2020). As informações contidas nas tabelas permitem concluir que o martelo demolidor empregado não conseguiu entregar potência e energia necessárias para promover a densificação adequada dos corpos de prova. Conforme já abordado, nessa fase foi utilizado um martelo da marca Bosch, modelo GSH 500, com potência nominal de 1100 W e energia de impacto de 7,5 J por golpe. De acordo com o TG2 (SABITA, 2020), o martelo demolidor adequado deve possuir as seguintes características: potência de 1700 W, massa de 11,5 kg, energia de impacto de 23 J por golpe e uma taxa de impacto de 900 a 1700 golpes por minuto. Dessa forma, é possível concluir que o equipamento usado na moldagem dos corpos de prova ITS não possuía os atributos mínimos necessários, não sendo indicado para compactação de materiais granulares estabilizados com emulsão asfáltica.

Tabela 16 - Moldagens para determinação da ITS na mistura 60%BGS_40%RAP.

Tipo de cura	Nº do corpo de prova	Teor de emulsão	Controle estatístico das densidades (g/cm ³)				Grau de compactação (%)
			Média	Média + 2,5%	Média - 2,5%	γ_{ap}	
Seca	1	2,9%	1,869	1,916	1,822	1,931	98,82
	2					1,888	93,30
	3					1,841	92,51
Seca + imersão	7	3,1%	1,856	1,902	1,810	1,863	89,91
	8					1,811	90,56
	9					1,879	92,91
Seca	4	3,3%	1,871	1,918	1,825	1,840	92,07
	5					1,909	93,84
	6					1,850	91,61
Seca + imersão	10	3,5%	1,861	1,908	1,814	1,879	92,26
	11					1,869	92,52
	12					1,791	88,40
Seca	19	3,3%	1,871	1,918	1,825	1,829	89,73
	20					1,848	91,20
	21					1,918	93,17
Seca + imersão	13	3,5%	1,861	1,908	1,814	1,893	92,49
	14					1,868	90,85
	15					1,873	90,29
Seca	22	3,5%	1,861	1,908	1,814	1,875	93,56
	23					1,883	92,87
	24					1,867	92,96
Seca + imersão	16	3,5%	1,861	1,908	1,814	1,847	91,47
	17					1,879	92,30
	18					1,813	87,89

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 17 - Moldagens para determinação da ITS na mistura 80%BGS_20%RAP.

Tipo de cura	Nº do corpo de prova	Teor de emulsão	Controle estatístico das densidades (g/cm ³)				Grau de compactação (%)
			Média	Média + 2,5%	Média - 2,5%	γ	
Seca	25	2,9%	1,893	1,940	1,846	1,911	93,51
	26					1,800	86,31
	27					1,877	90,15
Seca + imersão	31					1,973	96,59
	32					1,895	93,00
	33					1,905	93,09
Seca	28	3,1%	1,862	1,909	1,816	1,876	91,67
	29					1,799	87,59
	30					1,841	89,63
Seca + imersão	34					1,892	93,04
	35					1,891	93,60
	36					1,875	91,16
Seca	37	3,3%	1,932	1,981	1,884	1,954	93,87
	38					1,939	94,29
	39					1,970	95,58
Seca + imersão	40					1,935	93,69
	41					1,899	92,79
	42					1,896	93,07
Seca	43	3,5%	1,892	1,939	1,844	1,890	93,13
	44					1,897	92,62
	45					1,847	90,46
Seca + imersão	46					1,862	90,83
	47					1,919	93,08
	48					1,934	94,53

Fonte: elaborado pelo autor.

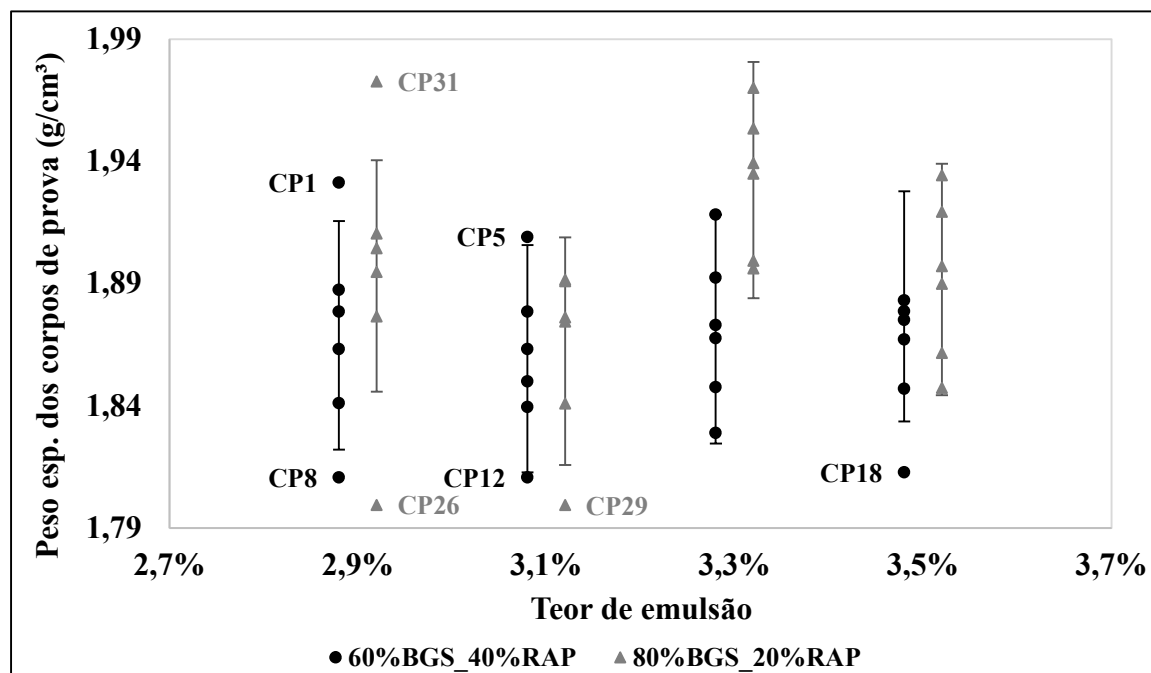
O controle estatístico das densidades preconizado pela metodologia de dosagem SABITA (2020) foi realizado e seus dados foram plotados, considerando as informações existentes nas tabelas 16 e 17. A figura 37 exhibe os resultados obtidos para ambas as misturas.

É possível destacar que as densidades dos corpos de prova de números 1, 5, 8, 12, 18, 26, 29 e 31 ficaram fora dos intervalos de aceitação e, dessa maneira, seus valores de ITS foram descartados para determinação do teor de projeto das misturas.

Outro aspecto que merece ser salientado é que, de uma maneira geral, os corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP alcançaram densidades levemente maiores quando comparados aos da mistura 60%BGS_40%RAP. Essa situação talvez possa ser explicada pelo fato de os corpos de prova da primeira terem sido moldados em três camadas, enquanto os da última foram compactados em duas. Isso promoveu, mesmo que de forma tímida, uma melhor densificação

do material, principalmente nos corpos de prova compactados em três camadas com aplicação de 120 segundos de vibração.

Figura 37 - Controle estatístico das densidades dos corpos de prova ITS.



Fonte: elaborado pelo autor.

A tabela 18 apresenta uma síntese com as características específicas da moldagem realizada em cada conjunto de corpos de prova, ou seja, identifica o número de camadas e o tempo de compactação aplicado.

Tabela 18 - Número de camadas e tempo de compactação aplicado na moldagem dos corpos de prova ITS.

Mistura	Nº corpo de prova	Moldagem		Densidades (g/cm³)		GC (%)	
		Nº camadas	Tempo	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
60%BGS_40%RAP	1 ao 6	2	60 s	1,846	0,052	93,69	2,64
	7 ao 24	2	120 s	1,801	0,033	91,41	1,67
80%BGS_20%RAP	25 ao 36	3	60 s	1,809	0,049	91,16	2,49
	37 ao 48	3	120 s	1,855	0,033	93,43	1,68

Fonte: elaborado pelo autor.

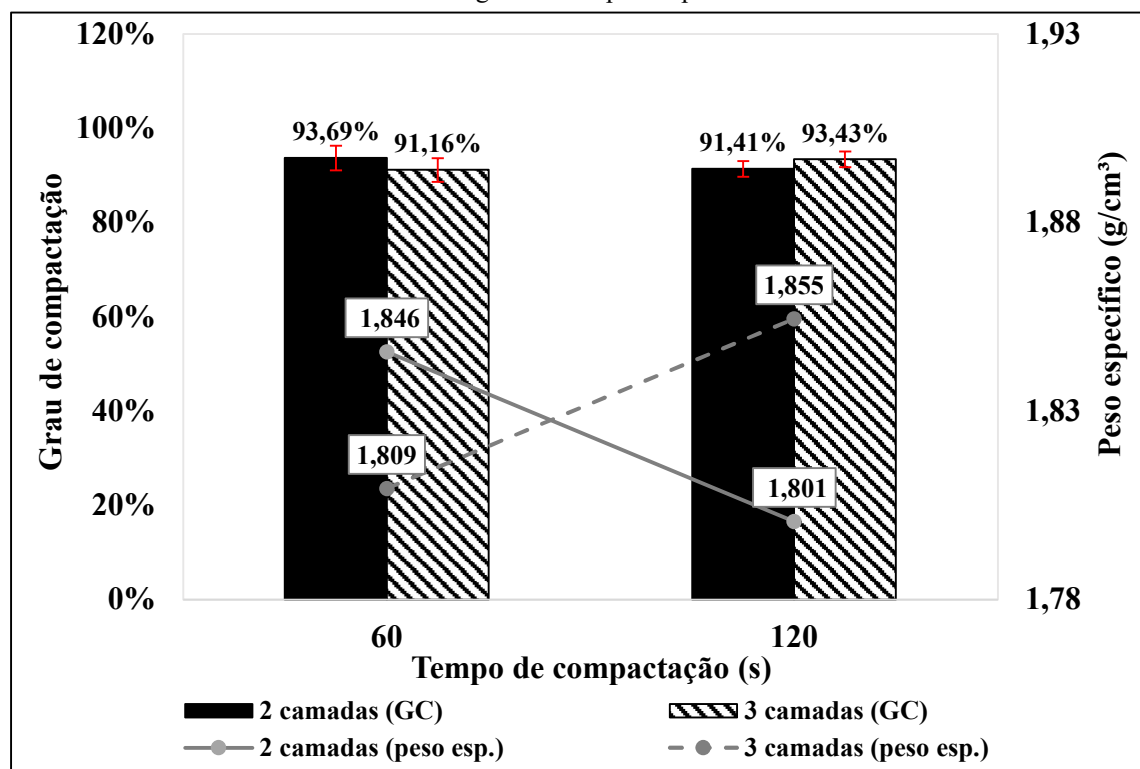
Os dados contidos na tabela 18 merecem alguns comentários. Um primeiro ponto a ser destacado é que, considerando os corpos de prova moldados em duas camadas, o aumento do tempo de compactação (de 60 para 120 segundos) não conseguiu melhorar a densificação da mistura 60%BGS_40%RAP. Levando-se em consideração as densidades médias obtidas, o acréscimo no período de vibração ocasionou uma redução nessa propriedade. Todavia, mediante uma análise mais detalhada, percebe-se que o corpo de prova número 1 obteve uma densidade consideravelmente maior quando comparada aos demais, elevando a média obtida e o desvio-padrão calculado para o conjunto. Isso pode ter ocorrido em função da própria variabilidade do material.

Vale destacar que, nos dias de moldagem, era feita a compactação de seis corpos de prova. A técnica denominada quarteamento, cujo objetivo é a redução das amostras, foi realizada até que a quantidade de material referente a um dia de moldagem fosse alcançada. O autor considera que, idealmente, as amostras deveriam ter sido quarteadas até que fosse obtida uma amostra representativa para moldagem de um único corpo de prova ou, ainda, que todo o material coletado no fornecedor (tanto a BGS quanto o RAP) fosse peneirado, sendo as frações referentes a cada uma das peneiras separadas e, posteriormente, a amostra representativa de cada corpo de prova fosse reproduzida em laboratório. Como esse procedimento não foi adotado, a variabilidade das amostras não pôde ser reduzida de forma satisfatória. Avaliando exclusivamente o corpo de prova número 1, é provável que o mesmo tenha ficado com uma menor proporção de agregados graúdos, fazendo com que o grau de compactação atingido por ele tenha sido superior aos demais. De qualquer forma, analisando as densidades obtidas, percebe-se que o martelo demolidor não conseguiu entregar, de fato, energia suficiente para promover a compactação adequada do material.

Por outro lado, a ampliação do tempo de compactação nos corpos de prova moldados em três camadas elevou discretamente as densidades alcançadas pela mistura 80%BGS_20%RAP. Quanto maior o número de camadas envolvidas no processo de moldagem, menor a quantidade de material existente em cada uma delas. Sendo assim, o emprego de um mesmo período de vibração resulta na aplicação de uma maior energia, promovendo uma densificação mais adequada de cada camada. Contudo, cabe ressaltar que todos os graus de compactação atingidos, para ambas as misturas, podem ser considerados insatisfatórios.

Um aspecto que também merece ser enfatizado é que o aumento no tempo de compactação produziu menores desvios-padrão para os quatro conjuntos de corpos de prova analisados. Esse mesmo comportamento foi observado por Meneses (2022) que, ao compactar corpos de prova Marshall com diferentes energias de compactação (50 e 75 golpes por face), percebeu que o emprego de maiores energias promoveu uma menor dispersão nos índices de vazios alcançados. Do ponto de vista da estrutura interna do corpo de prova, considerando o arranjo de suas partículas e o seu esqueleto mineral, alguns autores já relataram que a compactação do tipo vibratória tende a promover uma orientação horizontal dos agregados mais lamelares. Sendo assim, quanto maior o tempo de vibração aplicado, maior será o alinhamento dos agregados ao plano horizontal, fazendo com que a presença de possíveis partículas dispostas em um eixo inclinado seja minimizada. Isso torna o arranjo e a estrutura interna do corpo de prova mais homogênea, promovendo uma menor variabilidade nas densidades, graus de compactação e índices de vazios obtidos. Por fim, cabe esclarecer que o tempo de compactação de 120 segundos é o máximo preconizado pelo TG2 (SABITA, 2020), sendo essa recomendação seguida pelo presente estudo. A figura 38 ilustra graficamente os dados contidos na tabela 18.

Figura 38 - Influência do tempo de compactação e do número de camadas na moldagem dos corpos de prova ITS.



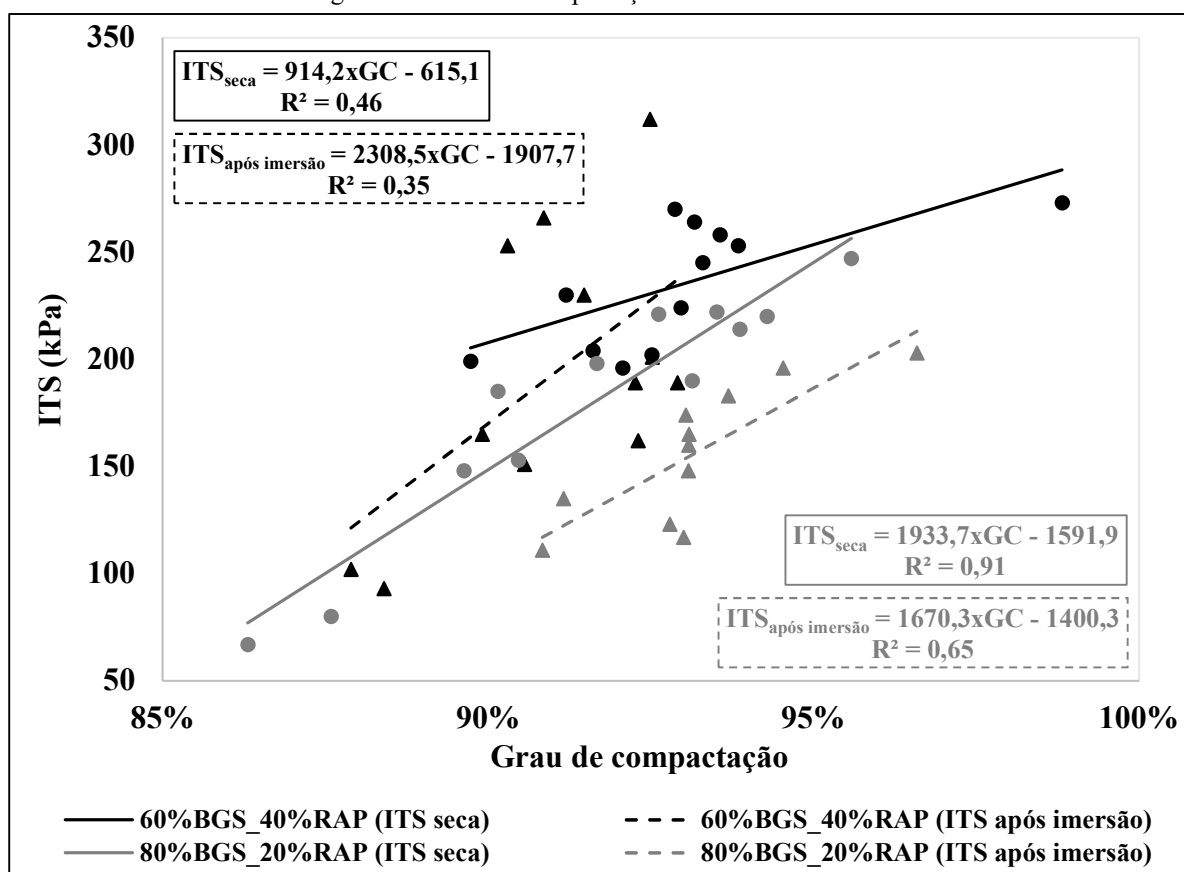
Fonte: elaborado pelo autor.

6.4.1.2 Influência do grau de compactação na resistência à tração indireta (ITS)

A figura 39 apresenta as correlações obtidas entre o grau de compactação dos corpos de prova e o parâmetro ITS.

Observa-se que o aumento do grau de compactação promoveu um acréscimo da ITS. Esse comportamento foi seguido por ambas as misturas para as duas condições de cura consideradas. Apesar de os coeficientes de determinação R^2 calculados serem relativamente baixos, com exceção da correlação ITS_{seca} da mistura 80%BGS_20%RAP, as tendências obtidas são inegáveis. Esses resultados vêm de encontro às observações feitas por outros autores como Yang *et al.* (2021), os quais destacam que a redução do índice de vazios é uma forma eficiente de aumentar a ITS dos materiais.

Figura 39 - Grau de compactação *versus* ITS das misturas.



Fonte: elaborado pelo autor.

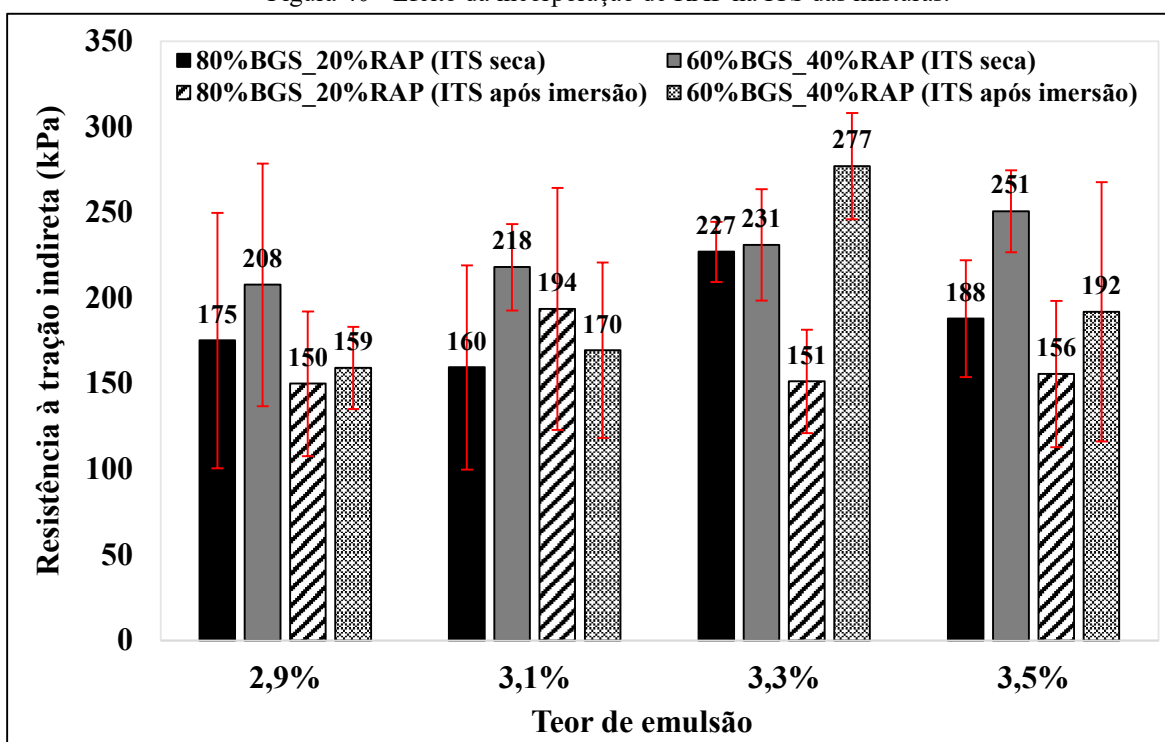
Cabe salientar que a mistura 60%BGS_40%RAP conseguiu alcançar maiores valores de ITS quando comparada à mistura 80%BGS_20%RAP, inclusive para os corpos de prova

submetidos à imersão. Esse fato pode ser explicado em função da emulsão empregada no presente estudo. Conforme já abordado, a emulsão utilizada atua diretamente na reativação das características aglutinantes do ligante asfáltico oxidado presente no RAP e, dessa forma, é bastante compreensível que a mistura contendo o maior teor desse tipo de agregado consiga obter uma melhor performance, devido à existência de uma maior quantidade de ligante disponível na mesma.

6.4.1.3 Efeito da incorporação de RAP na resistência à tração indireta (ITS)

A figura 40 exibe os resultados da ITS em função do teor de RAP incorporado às misturas. Os dados representam a média dos corpos de prova moldados em triplicata, levando em consideração os teores de emulsão acrescentados e o tipo de cura realizado.

Figura 40 - Efeito da incorporação de RAP na ITS das misturas.



Fonte: elaborado pelo autor.

Um primeiro aspecto a ser observado é que, no caso dos corpos de prova não submetidos à imersão, a mistura 60%BGS_40%RAP alcançou os melhores resultados, independentemente do teor de emulsão acrescentado. Isso corrobora a explicação feita no item anterior, reforçando que a mistura com maior percentual de RAP, por possuir uma quantidade superior de ligante

oxidado e, considerando que a emulsão rejuvenesce as propriedades desse insumo, é totalmente compreensível que a mistura 60%BGS_40%RAP obtenha um desempenho superior.

No caso dos corpos de prova submetidos à imersão, a situação se manteve idêntica, com exceção do conteúdo de emulsão de 3,1%. Nesse teor específico, a mistura com menor percentual de RAP obteve um melhor desempenho. Analisando as informações de maneira mais detalhada, percebe-se que o conjunto de corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP obteve um grau de compactação médio de 93,6%, enquanto o conjunto da mistura 60%BGS_40%RAP atingiu 91,2%. Sendo assim, sabendo-se que maiores graus de compactação afetam de forma positiva a ITS, explica-se parcialmente os resultados obtidos. Ainda, considerando que os corpos de prova com menor grau de compactação possuem um maior índice de vazios (e^0) e, conseqüentemente, uma menor resistência aos efeitos deletérios da umidade, os mesmos tendem a sofrer uma maior influência dos danos causados pela imersão, devido ao preenchimento dos vazios pela água, aspecto que também ajuda a explicar essa situação.

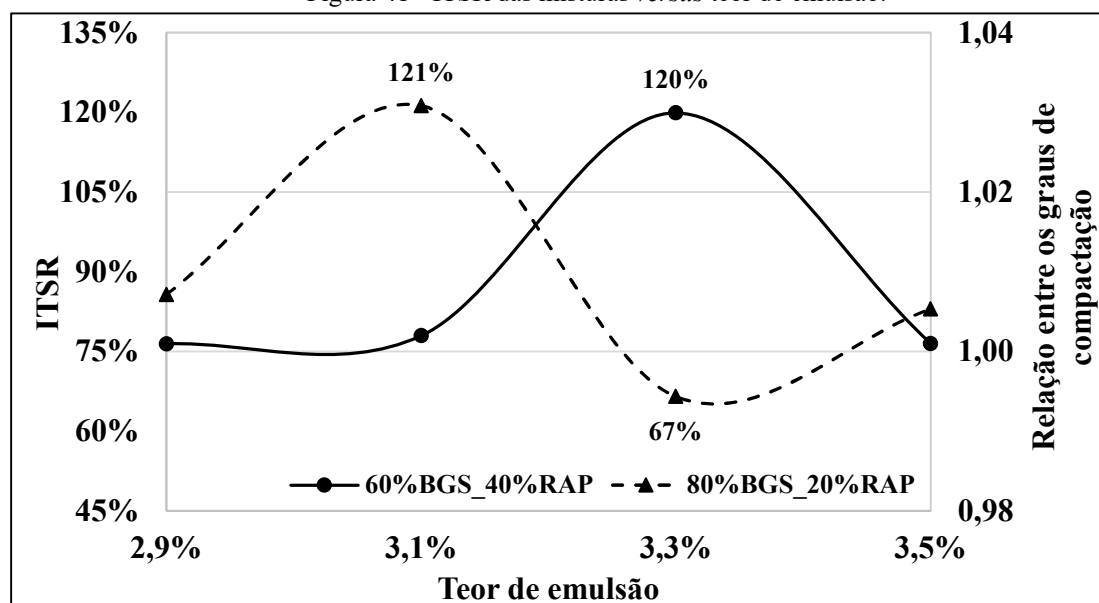
Por fim, destaca-se que o conjunto de corpos de prova da mistura 60%BGS_40%RAP submetidos à imersão com 3,3% de emulsão incorporada apresentou os melhores resultados de ITS. Avaliando o grau de compactação médio obtido para esse grupo, percebe-se que as densidades ficaram em patamares muito próximos aos demais conjuntos, não podendo ser indicada como uma possível razão para o melhor desempenho. Sendo assim, aparentemente, esses resultados indicam uma possível variabilidade existente no próprio processo de confecção dos corpos de prova, não sendo identificado nenhum aspecto notável que possa explicar tal comportamento. Cabe destacar que o corpo de prova número 13 obteve a maior ITS dentre os 48 corpos de prova rompidos, com um valor de 312 kPa.

6.4.1.4 Influência do teor de emulsão na relação entre as resistências à tração indireta (ITSR)

A figura 41 ilustra os resultados obtidos para o parâmetro ITSR em função dos teores de emulsão adicionados às misturas sendo possível visualizar, também, a influência dos graus de compactação nessa propriedade. Cabe esclarecer que uma relação entre os graus de compactação superior a um (>1) indica que o conjunto dos corpos de prova (triplicata) submetidos à imersão alcançou densidades médias maiores do que aqueles curados exclusivamente em estufa e a temperatura ambiente.

A análise da ITSR em função do teor de emulsão foi prejudicada devido às variações obtidas nas densidades dos diferentes conjuntos de corpos de prova avaliados. Mesmo assim, alguns pontos merecem ser discutidos. Primeiramente, é possível afirmar que a relação entre os graus de compactação afetou de forma dominante o parâmetro ITSR, enquanto o teor de emulsão praticamente não influenciou tal indicador. Observa-se que nos casos em que a relação entre os graus de compactação alcançou valores próximos a 1,03, o parâmetro ITSR sofreu um acréscimo bastante considerável, alcançando o patamar de 120% e, no episódio em que a relação obtida foi inferior a 1, a ITSR caiu para 67%. Esse comportamento pode ser explicado graças ao fato de as densidades alcançadas pelos corpos de prova submetidos à imersão serem superiores às aquelas calculadas para os corpos de prova não submersos. Maiores densidades indicam menores $e\%$, reduzindo os efeitos deletérios da ação da água e umidade.

Figura 41 - ITSR das misturas *versus* teor de emulsão.



Fonte: elaborado pelo autor.

De uma maneira geral, a mistura 80%BGS_20%RAP obteve um desempenho levemente superior para três dos quatro teores de emulsão adicionados. Conforme já abordado anteriormente, os corpos de prova desse material alcançaram maiores densidades quando comparados aos da mistura 60%BGS_40%RAP, fato que pode esclarecer tal comportamento. Considerando uma situação ideal, na qual a relação entre os graus de compactação seja muito próxima de um, nota-se que o parâmetro ITSR alcançou valores superiores a 75%, indicando que os teores de emulsão adicionados conseguiram proteger de forma satisfatória os corpos de

prova submetidos à imersão. Esse patamar mínimo de 75% é preconizado por algumas metodologias de dosagem como, por exemplo, o PG-4 empregado na Espanha (MINISTRY OF DEVELOPMENT, 2017).

Orosa *et al.* (2020) obtiveram valores de ITSR entre 77% e 87% para misturas compostas exclusivamente por RAP estabilizadas com emulsão asfáltica. Nesse estudo, os corpos de prova foram confeccionados por um compactador giratório, aplicando-se um total de 100 giros. Ao contrário do que se esperava inicialmente, o aumento no teor de emulsão não promoveu a mesma tendência de acréscimo na ITSR, a qual ascendeu inicialmente e, após passar por uma redução considerável, voltou a subir para os maiores teores de emulsão incorporados (8,75%). Já o trabalho de Iwanski e Chomicz-Kowalska (2013) encontrou correlações bastante fortes, com elevados coeficientes de determinação R^2 , entre a ITSR e os teores de asfalto espuma adicionados. Nessa última pesquisa, quanto maiores os teores acrescentados, mais elevados os percentuais de ITSR calculados.

Analisando criticamente as discussões realizadas nesse item o autor considera que, para se avaliar de forma eficaz o parâmetro ITSR, torna-se imprescindível que as densidades médias obtidas para os conjuntos de corpos de prova sejam bastante próximas, eliminando ou minimizando a influência das propriedades volumétricas. Essa situação ideal pode ser conquistada mediante o uso de um compactador giratório ou, ainda, com o emprego de um martelo demolidor adequado, que consiga alcançar as densidades determinadas no ensaio Proctor. De qualquer forma, nesse último caso, o autor sugere que seja feita uma calibração ou um estudo prévio do equipamento, visando definir o tempo de compactação a ser aplicado em cada camada. Isso promoverá uma densificação adequada dos corpos de prova.

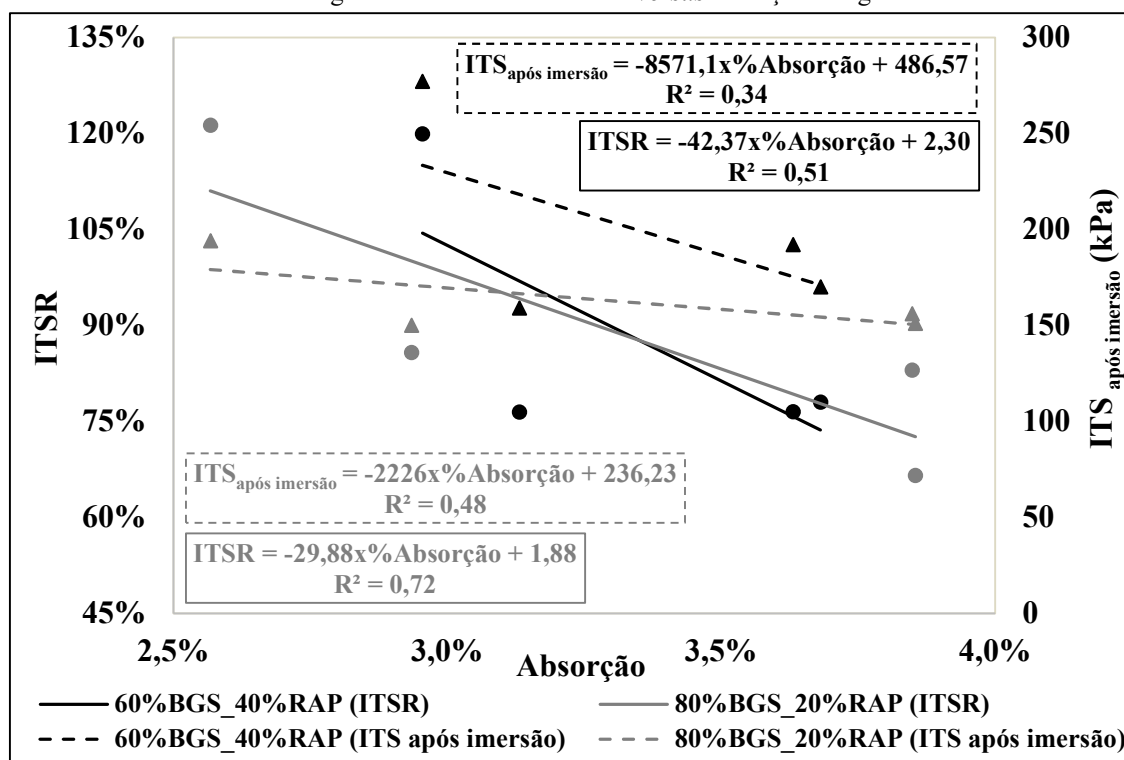
6.4.1.5 Influência da absorção de água na relação entre as resistências à tração indireta (ITSR)

A figura 42 apresenta as relações obtidas entre a ITSR e a absorção de água, considerando exclusivamente os dados oriundos dos corpos de prova submetidos ao processo de imersão. Nela, também é possível visualizar os valores da $ITS_{\text{após imersão}}$ de ambas as misturas.

Observa-se que um aumento na absorção promove uma queda no parâmetro $ITS_{\text{após imersão}}$ o que, conseqüentemente, acaba por reduzir a ITSR. Esse comportamento foi seguido por ambas as misturas. Corpos de prova com maiores e% possuem capacidade para absorver maiores

conteúdos de água, sendo esse um dos fatores que pode explicar tal desempenho pois, de acordo com discussões já realizadas, os parâmetros $e\%$ e ITS possuem uma relação inversa, ou seja, quando um é acrescido, o outro sofre uma atenuação. Vale citar que os modelos de ajuste da mistura 80%BGS_20%RAP atingiram melhores coeficientes de determinação R^2 quando comparados aos da mistura 60%BGS_40%RAP. Isso pode indicar que o aumento do teor de RAP na composição de materiais granulares tende a proporcionar uma maior variabilidade nos resultados. De uma maneira geral, os coeficientes R^2 obtidos podem ser considerados baixos, mas apesar disso, as tendências obtidas não podem ser desconsideradas.

Figura 42 - ITSR das misturas *versus* absorção de água.



Fonte: elaborado pelo autor.

Também cabe destacar que a mistura 60%BGS_40%RAP alcançou maiores valores de ITS após o processo de imersão, os quais variaram entre 159 kPa e 277 kPa, enquanto a mistura 80%BGS_20%RAP obteve resultados entre 150 kPa e 194 kPa. Conforme já abordado anteriormente, a mistura com maior percentual de RAP possui uma quantidade superior de ligante asfáltico oxidado em sua composição e, considerando que a emulsão adicionada consiga promover uma recuperação parcial das propriedades viscoelásticas desse ligante, explica-se o

porquê dessa mistura alcançar melhores resultados e ser menos susceptível aos danos provocados pela umidade.

Também é possível visualizar que a mistura 80%BGS_20%RAP sofreu uma redução menos acentuada no parâmetro ITSR. Esse aspecto pode ser verificado pela observação dos coeficientes angulares das retas que representam os modelos de ajuste obtidos. Sabe-se que os agregados do tipo RAP possuem suas superfícies revestidas por uma película de ligante asfáltico, situação que tende a dificultar a absorção de água por parte desses agregados. Isso faz com que uma parcela dos vazios superficiais permeáveis existentes logo abaixo da camada de ligante ou aqueles localizados entre os grumos formados pelo RAP não consigam ser preenchidos com água. Sendo assim, ao comparar as duas misturas, é possível cogitar que para um mesmo percentual de absorção, a mistura com maior teor de RAP passe a acumular o mesmo conteúdo de água de forma mais concentrada, em um menor número de vazios, fazendo com que os mesmos sejam preenchidos, em grande parte, pelo fluido. Considerando que a água é um líquido incompressível, o corpo de prova, ao sofrer qualquer redução de volume durante a execução do ensaio, ao tentar expulsá-la, acaba por ser rompido.

Já no caso dos corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP, a menor formação de grumos e a maior absorção por parte dos agregados não revestidos pelo ligante faz com que a água seja distribuída de forma mais homogênea por um maior número de vazios, os quais tendem a ter uma parcela considerável do seu volume preenchida por ar. Sabendo-se que o ar é um gás compressível, é possível que parte das reduções volumétricas observadas durante o rompimento dos corpos de prova sejam por ele suportados e, como a determinação da ITS leva em consideração o deslocamento lido pelo relógio comparador, é plausível que a mistura 80%BGS_20%RAP consiga suportar maiores leituras e, conseqüentemente, sofra uma menor influência da absorção no caso ora analisado.

Por fim, cabe destacar que o estudo de Graziani *et al.* (2018) buscou avaliar a influência do teor de água residual no parâmetro ITS em duas misturas compostas exclusivamente por RAP estabilizadas com emulsão asfáltica. O comportamento obtido pelos autores foi muito semelhante ao observado na presente pesquisa e, naquele caso, a ITS sofreu considerável redução com o aumento do conteúdo de água existente nos corpos de prova.

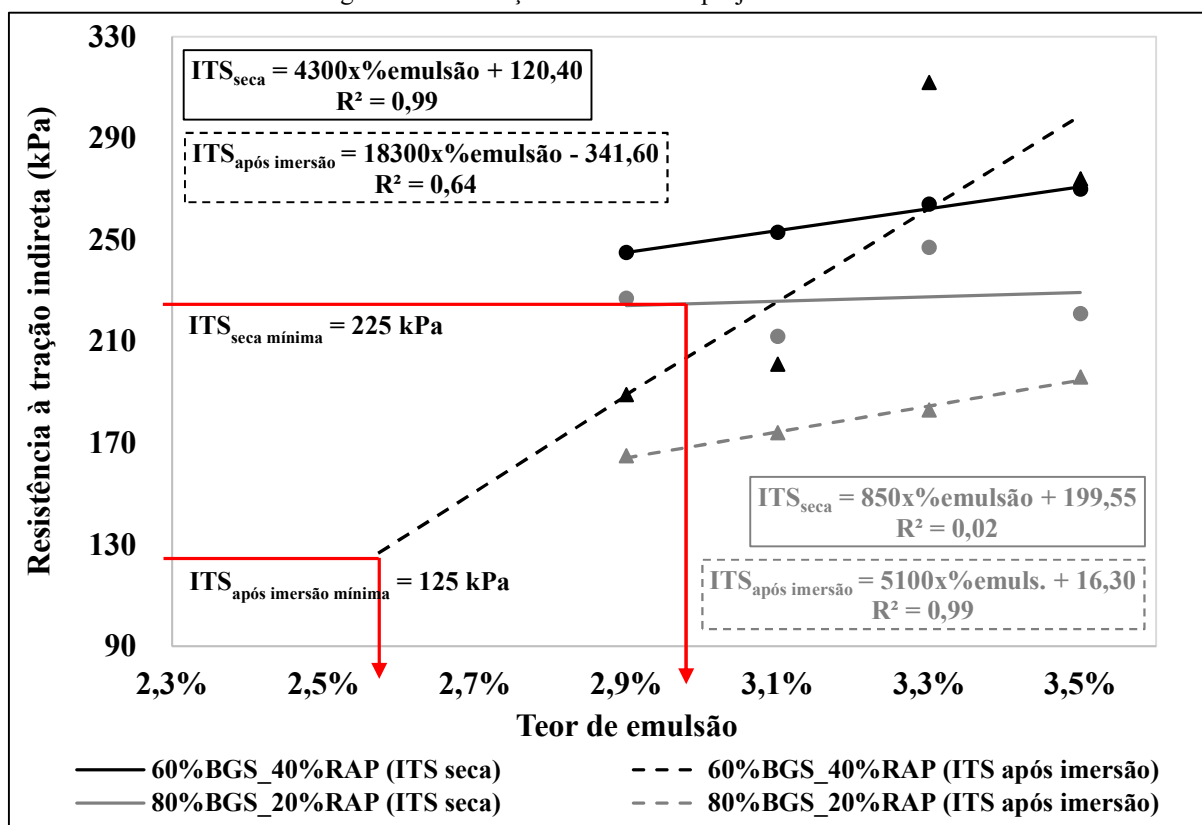
6.4.1.6 Definição dos teores de projeto

A figura 43 exibe os valores obtidos para o parâmetro ITS considerando os diferentes conteúdos de emulsão adicionados. A partir dela, foram definidos os teores de projeto de ambas as misturas, os quais foram utilizados na confecção dos demais corpos de prova dessa pesquisa.

O primeiro ponto a ser observado é que ambas as misturas conseguiram alcançar os valores mínimos preconizados pelo TG2 (SABITA, 2020), podendo ser classificados como materiais do tipo BSM1. Conforme já relatado, para os corpos de prova submetidos à cura seca, a metodologia de dosagem determina um valor mínimo para ITS de 225 kPa, enquanto os corpos de prova submetidos à imersão devem alcançar um valor mínimo de 125 kPa. Os modelos de ajuste obtidos para cada condição de cura foram comparados, sendo considerado para fins de dosagem aquele que resultou em um maior teor de emulsão. No caso da mistura 60%BGS_40%RAP, a definição do teor de projeto foi feita levando-se em consideração o modelo de ajuste obtido pelos corpos de prova submetidos à imersão, enquanto na mistura 80%BGS_20%RAP essa determinação foi realizada pela correlação apresentada pelos corpos de prova não submersos em água. As linhas vermelhas da figura 43 ilustram, esquematicamente, os teores de projeto selecionados. Para mistura 60%BGS_40%RAP, esse conteúdo ficou em 2,6%, considerando uma ITS mínima após a imersão de 125 kPa. O desempenho da mistura 80%BGS_20%RAP resultou em uma taxa de emulsão de 3%, para uma ITS seca mínima de 225 kPa. Esses resultados corroboram a tendência apresentada por Jenkins *et al.* (2021), estudo no qual os autores afirmam que o aumento do conteúdo de RAP promove uma queda nos teores de projeto obtidos por meio do processo de dosagem.

Outro aspecto a ser destacado é que os modelos de ajuste ITS_{seca} da mistura 60%BGS_40%RAP e $ITS_{após\ imersão}$ da mistura 80%BGS_20%RAP alcançaram coeficientes de determinação R^2 bastante elevados. Isso mostra que, nessas duas situações, os valores de ITS podem ser previstos e extrapolados com considerável confiabilidade levando-se em consideração diferentes teores de emulsão. Também vale destacar que os maiores R^2 foram obtidos pelos conjuntos de corpos de prova que apresentaram os menores desvios-padrão para o grau de compactação, indicando que os mesmos conseguiram alcançar densidades relativamente próximas. Essa circunstância acaba por proporcionar um melhor mapeamento do desempenho dos materiais frente ao parâmetro ITS, evidenciado pelos excelentes ajustes auferidos.

Figura 43 - Definição dos teores de projeto das misturas.



Fonte: elaborado pelo autor.

Por outro lado, enquanto a correlação $ITS_{após\ imersão}$ da mistura 60%BGS_40%RAP obteve um ajuste com qualidade intermediária ($R^2 = 0,64$), o fator negativo ficou por conta do modelo ITS_{seca} da mistura 80%BGS_20%RAP. Nesse último caso, os valores de ITS apresentaram uma elevada variabilidade, situação que acabou por prejudicar o modelo de ajuste alcançado, o qual obteve um $R^2 = 0,02$. Esse fato talvez possa ser explicado em função das baixas densidades alcançadas pelos corpos de prova moldados com 3,1% e 3,5% de emulsão os quais obtiveram, respectivamente, graus de compactação de 93,4% e 92,7%. Os demais corpos de prova do conjunto, moldados com 2,9% e 3,3% de emulsão atingiram, respectivamente, graus de compactação de 94,5% e 95,6%. Sendo assim, o corpo de prova com maior conteúdo de emulsão, em função da sua menor densidade, teve a determinação da ITS afetada de forma negativa e considerável. Isso explica o porquê de, no caso da mistura 80%BGS_20%RAP, o aumento do teor de emulsão ter promovido um acréscimo extremamente baixo (praticamente inexistente) na ITS dos corpos de prova não submetidos à imersão. Para todos os demais modelos, a adição de maiores quantidades de emulsão promoveu um crescimento, em maior ou menor escala, nesse parâmetro.

A tabela 19 apresenta a média dos graus de compactação dos conjuntos de corpos de prova utilizados na determinação dos teores de projeto das misturas, além dos seus respectivos desvios-padrão. Cada grupo é formado por quatro corpos de prova, ou seja, um para cada teor de emulsão incorporado.

Tabela 19 - Características dos conjuntos de corpos de prova considerados para determinação dos teores de projeto das misturas.

Mistura	Teor de projeto	Teor de ligante residual	Tipo de cura	GC (média)	Desvio-padrão (GC)
60%BGS_40%RAP	2,6%	1,57%	Seca	93,3%	0,41%
			Seca + imersão	93,1%	0,91%
80%BGS_20%RAP	3%	1,82%	Seca	94%	1,30%
			Seca + imersão	93,6%	0,70%

Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando as informações contidas na tabela acima, alguns comentários merecem ser destacados. Primeiramente, é possível concluir que os melhores modelos de ajuste (maiores R^2) foram alcançados por aqueles conjuntos que obtiveram os menores desvios-padrão. Ainda, o grupo que obteve o pior modelo de ajuste (mistura 80%BGS_20%RAP para o tipo de cura seca + imersão) apresentou o maior desvio-padrão dentre os quatro conjuntos analisados. Vale salientar que os graus de compactação obtidos foram insatisfatórios, indicando mais uma vez que o martelo demolidor empregado nessa etapa da pesquisa não conseguiu entregar potência e energia suficientes para promover a densificação adequada dos materiais.

Com relação a determinação dos teores de projeto, considerando a situação ideal e hipotética em que as densidades alvo tivessem sido alcançadas, é possível inferir que o parâmetro ITS teria seus valores elevados o que, inevitavelmente, faria com que os modelos de ajuste apresentados na figura 43 fossem deslocados para cima. Dessa forma, os teores de projeto selecionados seriam menores, resultando em maiores benefícios econômicos e ambientais. Isso mostra o potencial de aplicação da emulsão utilizada no presente estudo.

Por fim, cabe uma observação crítica com relação ao método de compactação vibratório. Embora o mesmo seja aplicado em campo, sua simulação dentro do laboratório acaba por não controlar de forma satisfatória uma série de propriedades, as quais só podem ser verificadas

após a conclusão da moldagem dos corpos de prova. Os desvios obtidos nos graus de compactação e nas densidades podem ser citados como um exemplo pois, por mais que o operador busque conferir a altura de cada uma das camadas compactadas, inevitavelmente, variações indesejadas sempre estarão presentes. Nesse sentido, do ponto de vista laboratorial, no qual todos os parâmetros envolvidos devem ter o máximo de controle e precisão, o autor acredita que a compactação do tipo giratória seja a mais indicada, por possibilitar um monitoramento contínuo das propriedades e reduzir consideravelmente as dispersões oriundas das densidades dos corpos de prova.

6.4.2 Resistência ao cisalhamento

Este item apresenta os resultados obtidos nos ensaios triaxiais de carregamento monotônico. Primeiramente, são feitas algumas considerações sobre o processo de compactação e, logo após, discutem-se os parâmetros de cisalhamento determinados para ambas as misturas.

6.4.2.1 Considerações sobre o processo de compactação

As tabelas 20 e 21 resumem, respectivamente, as características dos corpos de prova confeccionados para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas 60%BGS_40%RAP e 80%BGS_20%RAP. Também são apresentados, de forma detalhada, os tempos de compactação aplicados em cada uma das camadas durante o processo de moldagem.

Tabela 20 - Moldagens para determinação dos parâmetros de cisalhamento na mistura 60%BGS_40%RAP.

Tipo de cura	Nº do corpo de prova	Teor de emulsão	Tempo de compactação (s)					$\gamma_{ap.}$ (g/cm ³)	GC (%)
			1ª cam.	2ª cam.	3ª cam.	4ª cam.	5ª cam.		
Seca	1	2,6%	15	15	15	10	10	1,990	98,11
	2		10	10	15	25	35	1,957	97,19
	3		10	10	15	30	30	1,982	98,12
	4		15	15	15	15	15	1,994	98,25
	5		20	20	30	30	30	2,003	99,65
	6		30	30	30	30	30	2,035	100,37
	7		30	30	30	30	30	1,996	98,71
	8		30	30	30	30	30	2,029	100,25
Seca + imersão	9		30	30	30	30	30	1,999	98,57
	10		30	30	30	30	30	1,971	97,36

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 21 - Moldagens para determinação dos parâmetros de cisalhamento na mistura 80%BGS_20%RAP.

Tipo de cura	Nº do corpo de prova	Teor de emulsão	Tempo de compactação (s)					$\gamma_{ap.}$ (g/cm ³)	GC (%)
			1ª cam.	2ª cam.	3ª cam.	4ª cam.	5ª cam.		
Seca	11	3%						2,031	99,91
	12							2,045	100,05
	13							2,021	98,74
	14		30	30	30	30	30	2,037	99,56
	15		30	30	30	30	30	2,030	99,46
	17		30	30	30	30	30	2,028	99,12
	19		30	30	30	30	30	2,026	98,78
	20		30	30	30	30	30	2,049	100,17
Seca + imersão	16						2,025	99,48	
	18	30	30	30	30	30	2,039	99,72	

Fonte: elaborado pelo autor.

A primeira observação a ser feita é que as moldagens foram realizadas de forma sequencial. Sendo assim, percebe-se que para confecção dos corpos de prova de números 1 a 5 foram aplicados diferentes tempos de compactação, os quais variaram entre 10 e 35 segundos. Esse intervalo buscou avaliar qual o período de vibração necessário para que as camadas alcançassem as alturas preestabelecidas. Cabe ressaltar que, como o martelo demolidor utilizado nessa etapa da pesquisa foi diferente daquele empregado nos ensaios ITS, o autor ainda não possuía nenhuma experiência com tal ferramenta, circunstância que justifica a iniciativa adotada. Aqui, foi utilizado o martelo da marca Bosch, modelo GSH 11 VC, de acordo com a sugestão apontada pelo TG2 (SABITA, 2020). Na produção do corpo de prova número 6 foram aplicados 30 segundos de vibração em todas as cinco camadas e, considerando que o grau de compactação atingido foi de 100%, decidiu-se que todas as moldagens subsequentes seriam feitas dessa forma.

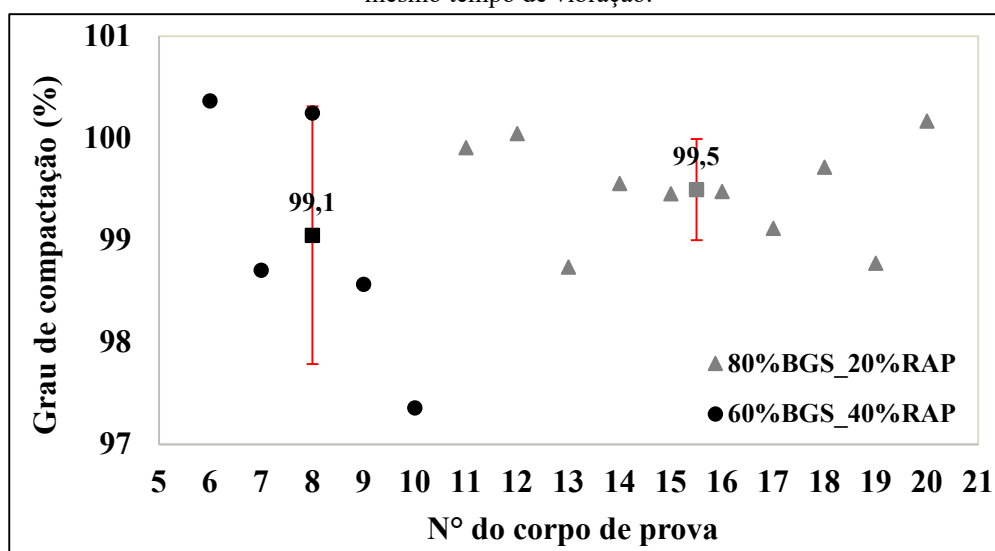
Um outro aspecto a ser destacado é que, nessa fase, não houve maiores problemas para alcançar o parâmetro $\gamma_{dmáx.}$ determinado no ensaio Proctor. Considerando que o tempo de vibração máximo preconizado pelo TG2 é de 120 segundos e comparando-o com o adotado nessa etapa, é possível concluir que o martelo demolidor conseguiria promover um maior nível de densificação em ambas as misturas.

A fim de avaliar e comparar os graus de compactação obtidos por ambas as misturas no processo de moldagem, seus dados foram plotados graficamente considerando exclusivamente os corpos

de prova confeccionados com o mesmo tempo de vibração (30 segundos/camada), ou seja, aqueles compreendidos entre os números 6 e 20. Essas informações estão representadas na figura 44.

Um primeiro comentário a ser feito sobre a figura 44 é que o conjunto de corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP obteve um grau de compactação médio (99,5%) superior ao da mistura 60%BGS_40%RAP (99,1%). Inicialmente, considerando que o $\gamma_{dm\acute{a}x}$ da primeira mistura (determinado no ensaio Proctor) foi levemente superior, talvez a tendência esperada fosse a de que o material com maior percentual de RAP alcançasse os melhores resultados, em função da sua menor densidade. Todavia, a avaliação das curvas granulométricas permite uma análise diversa. É possível perceber que a mistura 80%BGS_20%RAP possui, para peneiras com abertura superior a #6mm, uma granulometria mais fina. Esse fato talvez explique o comportamento aqui verificado no qual duas misturas contendo, praticamente, o mesmo teor de finos, aquela com menor parcela de agregados graúdos em sua composição obteve uma melhor compactação, considerando a aplicação de uma mesma energia de vibração.

Figura 44 - Graus de compactação dos corpos de prova 10x20cm moldados com o mesmo tempo de vibração.



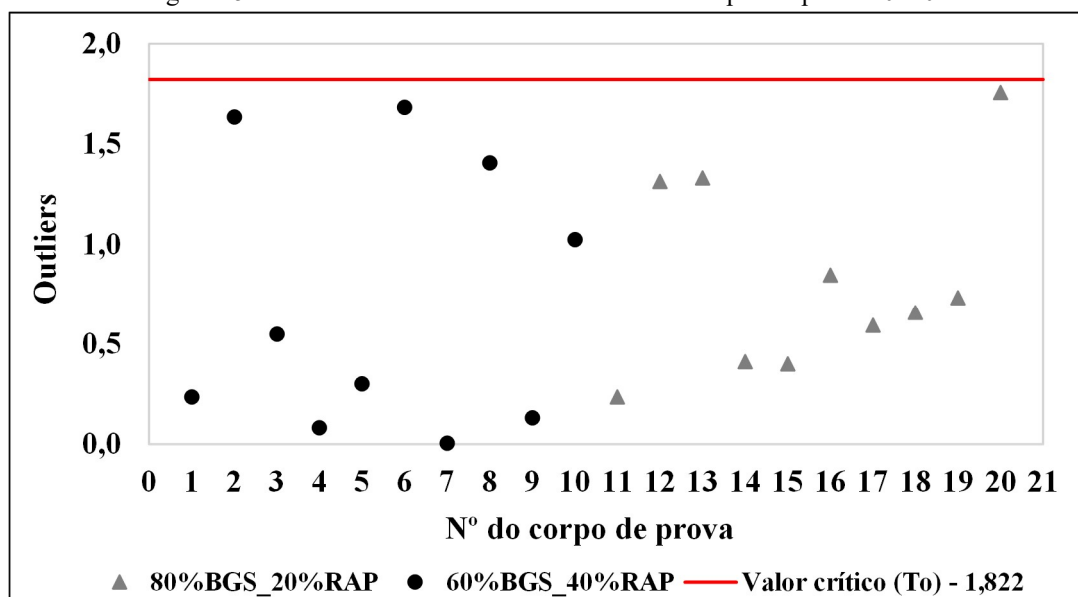
Fonte: elaborado pelo autor.

Outro ponto a ser observado diz respeito aos desvios-padrão calculados. Pela análise das barras de erros inseridas na figura acima, é possível perceber que a mistura 80%BGS_20%RAP apresentou um menor desvio para o conjunto de dados analisados. Em outras palavras, é

possível dizer que o aumento do teor de RAP ocasionou uma maior dispersão nos graus de compactação alcançados. Uma possível explicação para essa ocorrência diz respeito à própria variabilidade do agregado tipo RAP, o qual teve sua granulometria determinada apenas no início do programa experimental. Não foram feitas checagens intermediárias (no decorrer da pesquisa) nas curvas granulométricas, mas, devido ao fato de ambos os materiais terem sido recolhidos em uma única coleta, acredita-se que essa heterogeneidade tenha sido minimizada. Também cabe citar que existe uma variabilidade intrínseca em um processo de moldagem vibratória, fator que também pode ter contribuído para esse cenário. Por fim, ressalta-se que o maior desvio-padrão foi obtido pelo conjunto com a menor amostragem (apenas cinco corpos de prova). Considerando que o outro grupo analisado possuía um total de 20 corpos de prova em sua composição, isso também pode explicar parcialmente os resultados obtidos.

O controle estatístico das densidades preconizado pela metodologia de dosagem SABITA (2020) para verificação dos possíveis “outliers” foi realizado e as informações foram plotadas, considerando os dados contidos nas tabelas 20 e 21. A figura 45 exibe os resultados obtidos para ambas as misturas.

Figura 45 - Controle estatístico das densidades dos corpos de prova 10x20cm.



Fonte: elaborado pelo autor.

Pela análise da figura 45 é possível concluir que todos os corpos de prova moldados nessa etapa da pesquisa puderam ser aproveitados e rompidos para determinação dos parâmetros de cisalhamento. Como pode ser visto, os “outliers” calculados em função das densidades

aparentes para cada um dos corpos de prova ficaram abaixo do valor crítico determinado pelo TG2 ($T_o = 1,822$).

6.4.2.2 Determinação da coesão (c) e do ângulo de atrito interno (ϕ)

A tabela 22 exibe um resumo dos resultados obtidos nos ensaios triaxiais de carregamento monotônico. Nela, é possível visualizar as tensões confinantes (σ_3) aplicadas, as tensões principais na ruptura ($\sigma_{1,f}$) e a umidade dos corpos de prova no momento da realização do experimento.

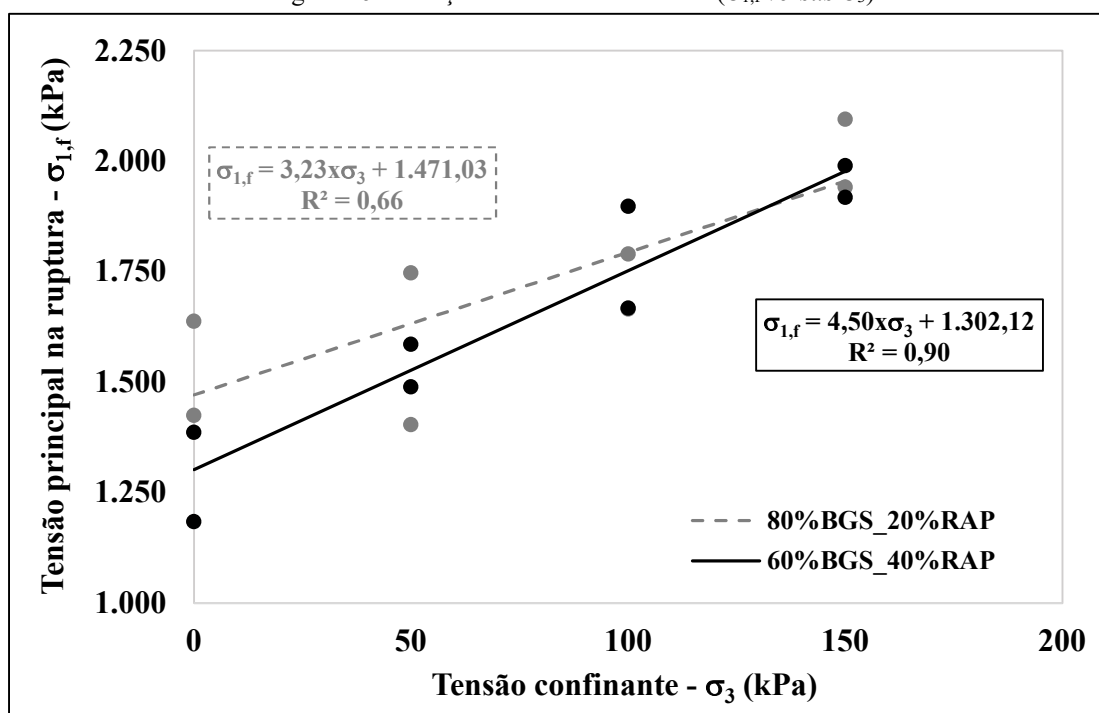
Tabela 22 - Resultados obtidos nos ensaios triaxiais de carregamento monotônico.

Mistura	Tipo de cura	Nº do corpo de prova	σ_3 (kPa)	Umidade (%)	$\sigma_{1,f}$ (kPa)
60%BGS_40%RAP		4	0	1,34	1.184,23
		8	0	0,97	1.386,25
	Seca	3	50	0,57	1.489,27
		6	50	1,32	1.585,27
		1	100	0,91	1.667,65
		5	100	0,41	1.897,62
		2	150	0,51	1.917,60
		7	150	0,88	1.989,60
	Seca + imersão	9	100	3,48	1.519,04
		10	100	3,26	1.440,45
80%BGS_20%RAP		12	0	1,16	1.424,86
		20	0	1,19	1.637,29
	Seca	11	50	0,62	1.747,27
		15	50	1,11	1.403,38
		14	100	1,23	1.789,73
		17	100	1,11	1.664,98
		13	150	1,14	1.941,15
		19	150	1,29	2.094,72
	Seca + imersão	16	100	3,56	1.505,39
		18	100	3,35	1.560,47

Fonte: elaborado pelo autor.

Para cada tensão confinante (σ_3) aplicada, foram determinadas as tensões principais na ruptura ($\sigma_{1,f}$) para todos os corpos de prova rompidos. Esses pontos foram plotados (vide tabela 22) e estão representados na figura 46. Regressões lineares foram realizadas a fim de estabelecer uma relação entre as tensões. A partir da figura 46 foi possível determinar os parâmetros de cisalhamento (c e ϕ) das misturas estudadas. A tabela 23 apresenta os resultados obtidos.

Figura 46 - Relação entre tensões obtidas ($\sigma_{1,f}$ versus σ_3).



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 23 - Parâmetros de cisalhamento das misturas estudadas.

Mistura	Regressão linear (modelos de ajuste)		c (kPa)	ϕ (°)
	Inclinação da reta (A)	Intercepto com eixo vertical (B)		
60%BGS_40%RAP	4,50	1.302,12	307	40
80%BGS_20%RAP	3,23	1.471,03	409	32

Fonte: elaborado pelo autor.

Pela análise da tabela acima é possível perceber que a mistura 60%BGS_40%RAP, cujos corpos de prova foram moldados com 2,6% de emulsão, apresentou um menor valor de coesão e um

maior ângulo de atrito interno quando comparada a mistura 80%BGS_20%RAP, a qual recebeu um conteúdo de emulsão de 3%. Em outras palavras, pode-se afirmar que o aumento no teor de emulsão provocou uma queda no ângulo de atrito interno e um acréscimo na coesão. Essa tendência também foi observada por outros autores como Orosa *et al.* (2022a), Pérez *et al.* (2020), Gómez-Meijide e Pérez (2015), dentre outros. Orosa *et al.* (2022a) destaca que o aumento do conteúdo de emulsão ocasiona uma redução do atrito interno devido ao efeito colateral da lubrificação entre os agregados.

Avaliando as regressões lineares obtidas, cabe destacar que a mistura com menor teor de emulsão (60%BGS_40%RAP) exibiu um modelo com maior inclinação. Essa circunstância pode ser explicada pela maior influência do esqueleto mineral do material, fator que acaba por elevar o ângulo de atrito interno da mistura e revela que, quanto menores os teores de emulsão acrescentados, maior a influência sofrida pela mistura frente ao estado de tensões aplicado.

Referente à coesão, percebe-se que existe uma relação entre esse parâmetro e o conteúdo de emulsão adicionado. Orosa *et al.* (2022a) determinou valores de coesão para misturas estabilizadas com diferentes teores de emulsão sob diferentes condições de cura. De acordo com os autores, os resultados obtidos pelos corpos de prova não submetidos ao processo de cura foram bastante similares, independentemente do teor de emulsão adicionado. Isso ocorreu pois, para idades de cura muito baixas (corpos de prova rompidos logo após a moldagem), a água presente na mistura ainda não havia evaporado, fazendo com que o aglutinante presente na emulsão não desenvolvesse suas propriedades coesivas. No caso da presente pesquisa, todos os corpos de prova foram curados em estufa antes de serem ensaiados, ou seja, a evaporação da água pôde ocorrer e as propriedades coesivas da emulsão puderam ser promovidas. Sendo assim, é bastante compreensível que a mistura estabilizada com o maior teor de emulsão tenha alcançado uma coesão mais elevada.

De acordo com o TG2 (SABITA, 2020), para os materiais serem classificados como do tipo BSM1, os parâmetros mínimos de cisalhamento devem ser de 250 kPa para coesão e 40° para o ângulo de atrito. Dessa forma, é possível verificar que ambas as misturas conseguiram atender ao critério de coesão proposto, mas, em se tratando do ângulo de atrito, apenas a mistura 60%BGS_40%RAP obteve tal desempenho. Essa situação pode ser parcialmente explicada devido ao fato de ter havido uma “superdosagem” das misturas na etapa dos ensaios ITS. Outra

possível interpretação é que a granulometria da mistura com menor teor de RAP não proporcionou o comportamento desejado para tal parâmetro.

De acordo com o exposto anteriormente, o martelo demolidor empregado nas moldagens anteriores não conseguiu promover a densificação adequada dos materiais, circunstância que afetou consideravelmente, de forma negativa, o desempenho das misturas frente ao parâmetro ITS. Caso o $\gamma_{dm\acute{a}x}$ tivesse sido alcançado, é bastante provável que os teores de projeto selecionados fossem reduzidos e, dessa forma, poderia haver uma maior influência do esqueleto mineral na determinação da resistência ao cisalhamento das misturas, fazendo com que os ângulos de atrito fossem majorados. De certa forma, os elevados valores de coesão alcançados, superiores aos 250 kPa preconizados pelo TG2, corroboram essas considerações.

Embora a mistura 80%BGS_20%RAP não tenha conseguido alcançar o ângulo de atrito mínimo preconizado pelo TG2, o processo de dosagem foi considerado concluído e a compactação dos corpos de prova 15x30cm para realização dos ensaios triaxiais de módulo de resiliência foi feita com os mesmos teores de emulsão aqui empregados.

Por fim, vale destacar que, de uma maneira geral, os corpos de prova rompidos no ensaio triaxial de carregamento monotônico não apresentaram um plano de ruptura típico. De acordo com a teoria da mecânica dos solos (LAMBE e WHITMAN, 1969), a superfície de ruptura pode ser representada por um plano cujo ângulo formado com o eixo horizontal deve ser calculado pela expressão $\theta = 45^\circ + \phi/2$. Gómez-Meijide e Pérez (2015), ao realizarem ensaios triaxiais monotônicos em misturas a frio estabilizadas com emulsão, observaram esse comportamento, sendo que o ângulo dos planos de ruptura ficou em torno de 66° . Orosa *et al.* (2022a) também presenciou a formação de superfícies de cisalhamento, as quais apresentaram um plano de ruptura com inclinação aproximada de 60° . Todavia, cabe destacar que em ambos os estudos recém citados não foi adicionada nenhuma quantidade de cimento nas misturas a frio estabilizadas com emulsão. Dessa forma, o comportamento obtido na presente pesquisa indica que a adição de cimento, mesmo que em baixos teores (1% nesse caso), tende a inibir a formação das superfícies de cisalhamento.

A figura 47 ilustra o aspecto de alguns corpos de prova já rompidos, logo após a realização dos ensaios. Como pode ser observado, na maioria dos casos não foi possível visualizar nenhum plano de ruptura, ou seja, quase que a totalidade dos corpos de prova apresentou uma ruptura por embarrilamento. Em alguns casos específicos, após a retirada dos corpos de prova da estufa,

processo realizado para determinação da umidade, pôde ser constatado um possível plano de ruptura, o qual não foi percebido no momento da realização dos ensaios.

Figura 47 - Corpos de prova rompidos no ensaio triaxial de carregamento monotônico: rupturas por embarrilamento (à esquerda e ao centro) e um possível plano de ruptura após a remoção do corpo de prova da estufa.



Fonte: arquivo pessoal do autor.

6.4.2.3 Avaliação da coesão retida (RetC)

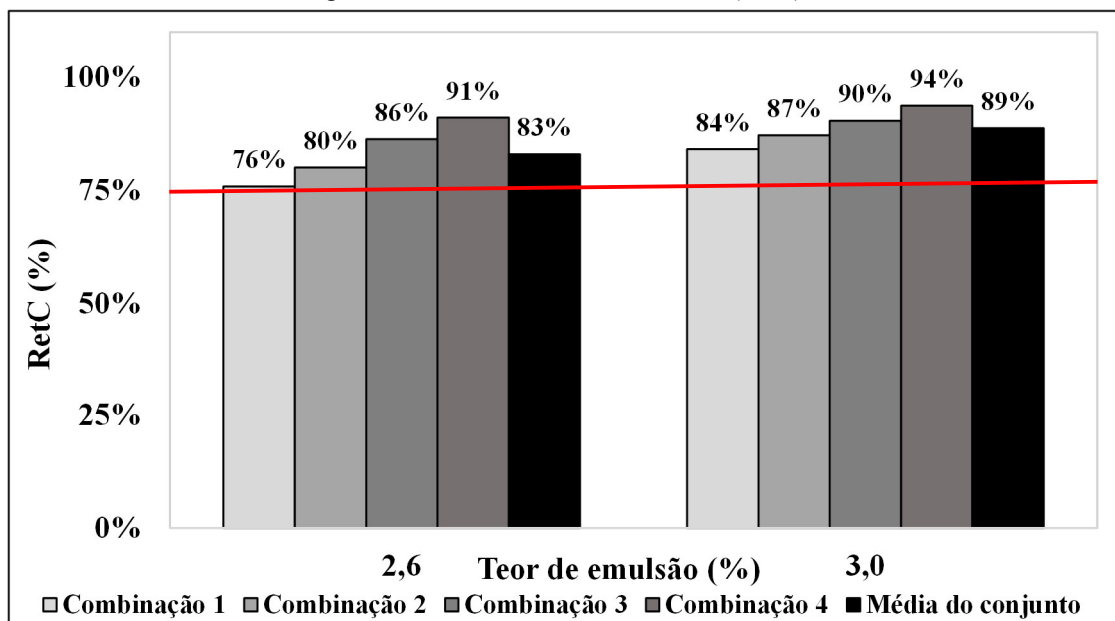
A última etapa do processo de dosagem consistiu na verificação da coesão retida (RetC) das duas misturas estudadas. Vale lembrar que essa propriedade foi calculada levando-se em consideração as tensões principais na ruptura ($\sigma_{1,f}$) exibidas na tabela 22, para os corpos de prova rompidos com uma tensão confinante (σ_3) de 100 kPa.

Na figura 48 são apresentados os resultados obtidos para o parâmetro RetC. Pela análise da mesma, é possível observar que ambas as misturas conseguiram alcançar o percentual mínimo de 75% (linha vermelha) preconizado pelo TG2 (SABITA, 2020). Cabe esclarecer que, devido ao fato de haver dois corpos de prova rompidos na σ_3 de 100 kPa para cada tipo de cura, isso possibilitou a avaliação de quatro combinações para cada mistura. Em todos os cenários avaliados, o valor mínimo foi atingido. Para fins de dosagem, o TG2 determina que seja levado em consideração o valor obtido pela média do conjunto, representado pelas colunas pretas.

Um aspecto a ser destacado é que o incremento no teor de emulsão provocou um aumento na RetC. Enquanto a mistura 60%BGS_40%RAP, estabilizada com 2,6% de emulsão, obteve uma relação de 83%, a mistura 80%BGS_20%RAP, na qual foi adicionado 3% de emulsão, alcançou

89%. Esse comportamento é bastante condizente com diversos relatos existentes na literatura, pois a adição de um agente aglutinante tende a elevar a estanqueidade e a resistência dos materiais aos efeitos nocivos da água. Dessa forma, quanto maior o teor de emulsão incorporado, maior tende a ser a durabilidade do material frente à umidade.

Figura 48 - Resultados da coesão retida (RetC).



Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim, cabe aqui o mesmo comentário feito na seção anterior. Considerando a situação hipotética em que os $\gamma_{dm\acute{a}x}$ tivessem sido alcançados na etapa dos ensaios ITS, é bastante provável que os teores de emulsão de projeto selecionados fossem menores. Essa situação poderia afetar de forma negativa o parâmetro RetC, fazendo com que os percentuais aqui alcançados fossem reduzidos.

6.5 ENSAIOS TRIAXIAIS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Esta seção discute os resultados obtidos nos ensaios triaxiais de módulo de resiliência. Em um primeiro momento, são tecidos alguns comentários sobre o processo de compactação e, posteriormente, debatem-se os resultados obtidos nos experimentos.

6.5.1 Considerações sobre o processo de compactação

A tabela 24 resume as características dos corpos de prova confeccionados para realização dos ensaios triaxiais de módulo de resiliência. Nela, também são exibidos os tempos de compactação aplicados em cada uma das camadas durante o processo de moldagem.

Tabela 24 - Características dos corpos de prova moldados para realização dos ensaios triaxiais de módulo de resiliência.

Mistura	Tipo de cura	Nº do corpo de prova	Tempo de compactação	$\gamma_{ap. seco}$ (g/cm ³)	GC (%)
60%BGS_40%RAP	Controlada (SABITA, 2020)	1	50 s (todas as camadas)	1,985	100,77
		2	50 s (camadas 1 a 5) 60 s (camadas 6 a 10)	1,984	100,71
	Estendida (14 dias)	3	50 s (todas as camadas)	1,975	100,27
		4	50 s (todas as camadas)	1,965	99,76
80%BGS_20%RAP	Controlada (SABITA, 2020)	5	50 s (camadas 1 a 3) 40 s (camadas 4 a 6) 30 s (camadas 7 a 10)	2,067	104,15
		6	40 s (camadas 1 a 4) 30 s (camadas 5 a 7) 20 s (camadas 8 a 10)	2,022	101,86
	Estendida (14 dias)	7	30 s (camadas 1 a 5) 20 s (camadas 6 a 10)	2,030	102,28
		8	20 s (todas as camadas)	2,056	103,57

Fonte: elaborado pelo autor.

Com relação a tabela 24, cabe esclarecer que as camadas foram numeradas de forma sequencial, ou seja, a camada de nº 1 foi a primeira a ser compactada, ficando localizada no fundo dos corpos de prova, enquanto a de nº 10 se encontra na superfície dos mesmos. Os corpos de prova também foram numerados de forma sequencial, sendo possível notar que as moldagens dessa etapa foram iniciadas pela mistura 60%BGS_40%RAP. De uma maneira geral, a confecção dos corpos de prova dessa mistura foi feita aplicando-se 50 segundos de vibração em cada camada. Houve uma pequena variação apenas no corpo de prova nº 2, o qual recebeu 60 segundos de vibração nas últimas cinco camadas. Já na mistura 80%BGS_20%RAP, os tempos de vibração tiveram que ser reduzidos, a fim de não promover uma densificação excessiva das amostras. Nesse último caso, a aplicação do mesmo tempo de vibração que vinha sendo adotado até então

ocasionou uma compactação excessiva do corpo de prova nº 5. Aqui, assim como na moldagem dos corpos de prova 10x20cm, houve uma menor dificuldade em se atingir a densidade alvo na mistura 80%BGS_20%RAP. Essa situação já foi discutida anteriormente e pode ser explicada pelo fato de a mistura com maior percentual de RAP possuir uma quantidade superior de agregados graúdos, fazendo com que a energia de compactação aplicada seja majorada.

Em se tratando dos graus de compactação, é possível perceber que não houve problemas para que os $\gamma_{dm\acute{a}x}$ fossem alcançados. Dentre os oito corpos de prova moldados, apenas o de nº 4 obteve uma densidade levemente inferior a desejada (GC = 99,76%). O conjunto de corpos de prova da mistura 60%BGS_40%RAP obteve um grau de compactação médio de 100,38%, enquanto o grupo da mistura 80%BGS_20%RAP atingiu 102,97%. Essas informações corroboram o fato de que o martelo demolidor utilizado, da marca Bosch, modelo GSH 11 VC, pode ser considerado adequado para moldagem de misturas a frio estabilizadas com emulsão asfáltica.

Quanto aos tempos de vibração aplicados, percebe-se que os mesmos foram relativamente maiores quando comparados aos empregados na etapa de resistência ao cisalhamento. Isso pode ser explicado em função das dimensões dos corpos de prova. Como aqui eles foram confeccionados no tamanho 15x30cm, a quantidade de material compactada em cada camada foi consideravelmente maior, implicando na adoção de maiores tempos de vibração para que a mesma energia de compactação pudesse ser entregue.

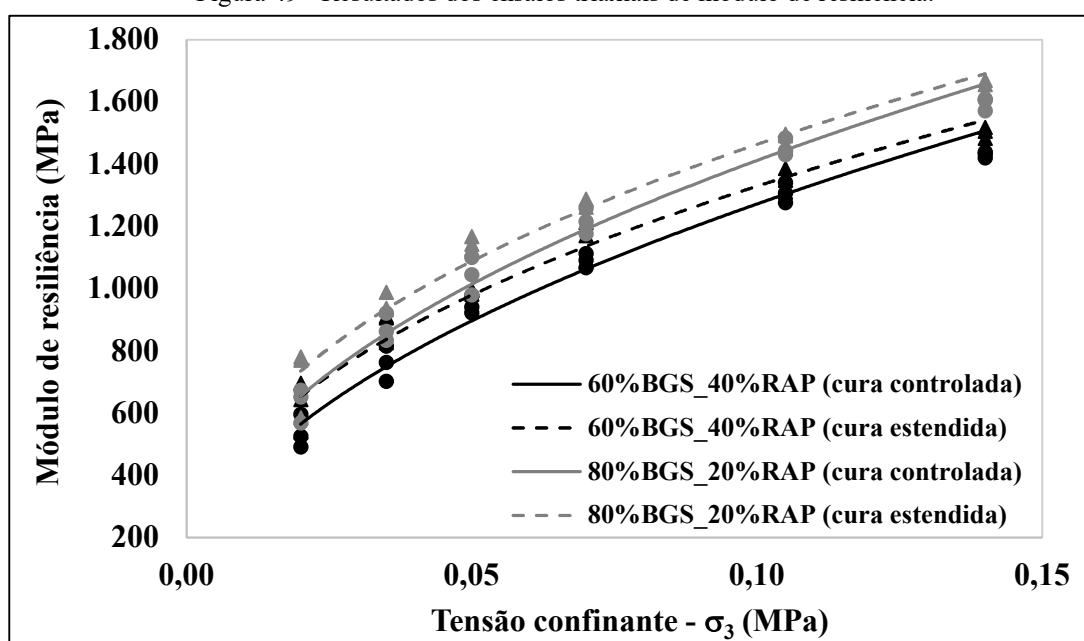
Um outro ponto a ser destacado diz respeito ao tamanho máximo nominal dos agregados. Para determinação da resistência ao cisalhamento, foram eliminados aqueles com dimensões superiores a #19,1mm (3/4"). Já aqui, ocorreu apenas a remoção daqueles retidos na peneira de abertura #38,1mm (1 1/2"), resultando na presença considerável de agregados graúdos, fazendo com que fosse necessário o emprego de uma maior energia de compactação para promover o intertravamento adequado das partículas.

6.5.2 Avaliação do tempo de cura na rigidez das misturas

Na figura 49 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios triaxiais de módulo de resiliência de acordo com o modelo de ajuste $k-\sigma_3$. Cada modelo obtido representa a média dos corpos de prova ensaiados em duplicata para cada mistura e condição de cura.

O primeiro aspecto a ser observado é que ambas as misturas estudadas nessa pesquisa apresentaram um comportamento dependente do estado de tensões, ou seja, elas podem ser caracterizadas como materiais granulares. Esses resultados corroboram alguns estudos já realizados por outros pesquisadores, os quais indicam que a adição de ligantes asfálticos (asfalto espuma ou emulsão) e baixos teores de cimento (até 1%) faz com que os materiais do tipo BSM se comportem de forma semelhante aos granulares (GUATIMOSIM, 2015; KUCHIISHI, 2019; PÉREZ *et al.* 2020; SABITA, 2020; MENESES, 2022; OROSA, 2022b).

Figura 49 - Resultados dos ensaios triaxiais de módulo de resiliência.



Fonte: elaborado pelo autor.

Outro ponto a ser destacado é que a mistura 80%BGS_20%RAP apresentou uma maior rigidez quando comparada à mistura 60%BGS_40%RAP, isso para ambas as condições de cura. Em outras palavras, é possível afirmar que o acréscimo no teor de RAP promoveu uma piora no comportamento mecânico. Essa constatação vem de encontro ao observado por Ebels (2008) que, ao listar a influência de algumas variáveis nas propriedades mecânicas de materiais estabilizados com emulsão, concluiu que o aumento do teor de RAP afeta de forma negativa as misturas a frio, tornando-as mais elásticas. Na etapa de caracterização dos agregados, não foi feita a determinação do teor de ligante presente no RAP. Sendo assim, não foi possível estabelecer a quantidade total de ligante, considerando o RAP e a emulsão, presente nas misturas. É possível que esse conteúdo total também tenha afetado o comportamento resiliente

dos materiais, sendo necessários estudos futuros mais detalhados para verificação de tal comportamento.

Com relação ao processo de cura, fica evidente que os corpos de prova ensaiados após o maior período, denominado de cura estendida (14 dias), alcançaram melhores resultados quando comparados aos corpos de prova submetidos ao experimento após a cura controlada (5 dias). Essa situação ocorreu para ambas as misturas. Orosa *et al.* (2022b) determinou o comportamento resiliente de misturas a frio 100% RAP estabilizadas com emulsão para diferentes períodos de cura. De acordo com esse estudo, aquelas ensaiadas logo após a compactação obtiveram os piores resultados, enquanto as que foram submetidas ao ensaio 60 dias após a moldagem alcançaram os melhores valores. Os autores associaram essa melhoria na rigidez ao processo de evaporação da água e ao rompimento da emulsão. Kuchiishi (2019) fez considerações acerca da sucção mátrica existente nos materiais tipo BSM. Segundo esse autor, quando o corpo de prova a ser ensaiado possui um menor teor de umidade, os valores de sucção medidos são maiores, fator que afeta de forma positiva a rigidez das misturas, fazendo com que os valores de módulo de resiliência obtidos sejam elevados e, dessa maneira, o comportamento mecânico das misturas seja alavancado.

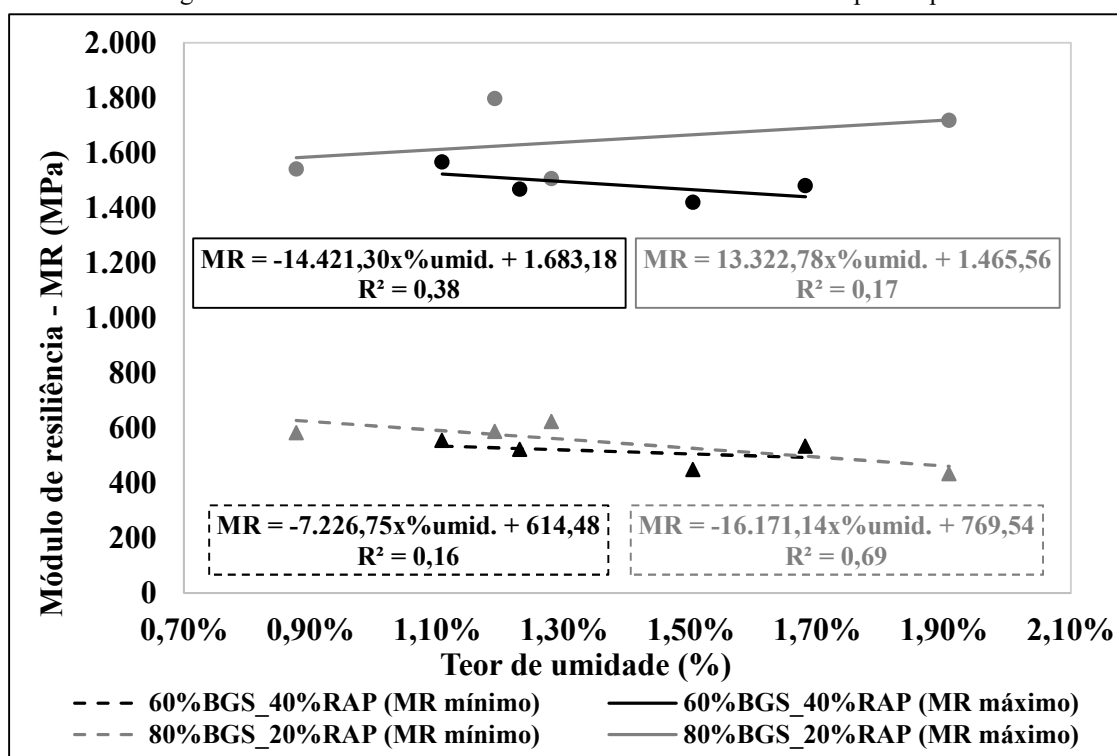
Com intuito de verificar as considerações feitas acima e explicar o desempenho superior dos corpos de prova submetidos a um maior período de cura, foi elaborada a figura 50. Nela, é possível visualizar os valores máximos e mínimos do módulo de resiliência de cada uma das misturas em função do teor de umidade medido nos corpos de prova no momento da realização do ensaio. Como é possível perceber, um maior período de cura promove uma redução nos teores de umidade, o que tende a aumentar a rigidez dos materiais.

Em se tratando da mistura 60%BGS_40%RAP, os valores mínimos do módulo de resiliência para condição de cura controlada e estendida foram, respectivamente, 491 MPa e 539 MPa, um aumento de aproximadamente 10%. Já os valores máximos obtidos ficaram em 1439 MPa e 1518 MPa, um acréscimo de quase 6%. Para mistura 80%BGS_20%RAP, os menores módulos medidos considerando as curas controlada e estendida foram, respectivamente, 569 MPa e 585 MPa, um acréscimo de apenas 3%. Já os valores máximos passaram de 1610 MPa para 1669 MPa, uma melhoria pequena de quase 4%.

As regressões apresentadas na figura 50, apesar dos baixos coeficientes de determinação R^2 alcançados, permitem concluir que, de fato, o aumento nos teores de umidade provoca uma

queda nos valores do módulo de resiliência. Isso pode ser verificado pelos coeficientes de inclinação negativos das retas de ajuste. Essa situação corrobora o que foi dito anteriormente, ou seja, quanto maior o período de cura, menores tendem a ser os teores de umidade, devido a evaporação da água, fazendo com que o comportamento resiliente das misturas ensaiadas após os 14 dias tenha sido superior.

Figura 50 - Módulo de resiliência *versus* teor de umidade dos corpos de prova.



Fonte: elaborado pelo autor.

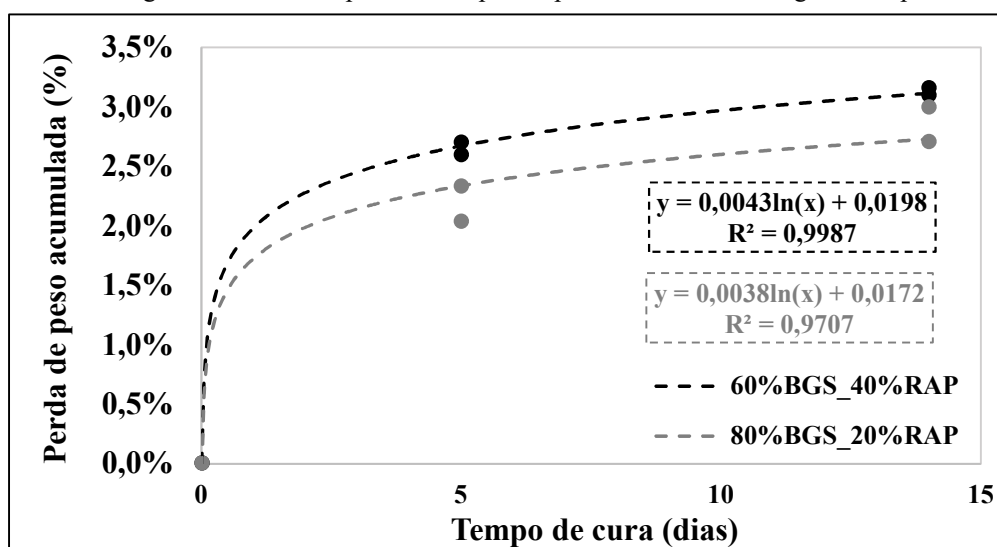
Ainda com relação a figura 50, cabe salientar que apenas a regressão linear determinada para mistura 80%BGS_20%RAP, considerando os valores máximos do módulo de resiliência, não apresentou uma tendência de queda com o acréscimo do conteúdo de água. Isso pode ser explicado pelas diferenças obtidas nos graus de compactação durante o processo de moldagem. É possível verificar que, quando o grau de compactação aumenta, como no caso dos corpos de prova 5 e 8, os valores de módulo também são afetados de forma positiva. Já no caso dos corpos de prova 6 e 7, os quais alcançaram graus de compactação de, respectivamente, 101,86% e 102,28%, ou seja, densidades bastante próximas, os valores de módulo também reduziram com o aumento da umidade. Essa circunstância ressalta que o comportamento resiliente das misturas estudadas é influenciado, predominantemente, pela densidade dos corpos de prova.

Os resultados obtidos nessa pesquisa seguiram a mesma tendência apresentada pelos estudos realizados por Kuchiishi (2019) e Meneses (2022), destacando que o acréscimo no teor de umidade provoca uma queda na rigidez dos materiais tipo BSM, propriedade que é influenciada pelo fenômeno da sucção. Sendo assim, o autor destaca a importância que deve ser dada, nos casos de aplicação da reciclagem tipo FDR em projetos de restauração rodoviária, para que as camadas recicladas sejam devidamente curadas sem a ação do tráfego. Caso contrário, o risco de que a mesma apresente um comportamento resiliente insatisfatório, tão logo sua execução seja concluída, não deve ser desprezado, e o seu comportamento resiliente deve ser compreendido, por parte do projetista, para períodos de cura bastante reduzidos.

6.5.3 Evolução da perda de umidade em função do tempo de cura

A perda de peso acumulada dos oito corpos de prova moldados nessa etapa da pesquisa foram registradas ao longo do tempo. Os resultados são apresentados na figura 51. É possível perceber que durante o período de cura controlada (0 a 5 dias) houve uma evaporação mais rápida da água, resultando em uma maior perda de peso acumulada durante esse intervalo. Isso pode ser explicado pelo fato de os corpos de prova terem sido submetidos a um processo de cura controlada em estufa à 40°C, circunstância que colabora de forma significativa para que a evaporação da água e o rompimento da emulsão ocorram. Além disso, os conteúdos de água dentro dos corpos de prova logo após a conclusão do processo de moldagem são significativos, fator que também contribui para que uma rápida evaporação aconteça.

Figura 51 - Perda de peso dos corpos de prova 15x30cm ao longo do tempo.



Fonte: elaborado pelo autor.

Após a etapa de cura controlada, nota-se que a perda de peso acumulada ocorreu de forma mais lenta. No íterim de 5 a 14 dias, vale relembrar que os corpos de prova foram colocados a temperatura ambiente (25°C), temperatura inferior a praticada na etapa inicial da cura. Essa circunstância explica, em parte, a evaporação mais lenta da água nesse período. Ainda cabe destacar que, com o passar do tempo, o conteúdo de água a ser evaporado diminui, situação que também colabora para que a perda de peso ocorra de forma mais demorada.

Os corpos de prova da mistura 60%BGS_40%RAP apresentaram uma maior perda de peso acumulada para ambas as condições de cura. Isso pode ser explicado em função dos teores de fluido empregados na etapa de moldagem. Conforme já observado, os corpos de prova da mistura 60%BGS_40%RAP foram compactados com um OFC de 7,4%, enquanto o OFC da mistura 80%BGS_20%RAP foi de 7%. Dessa forma, devido ao maior conteúdo de água disponível, é bastante compreensível que a mistura 60%BGS_40%RAP tenha alcançado uma maior evaporação.

Salienta-se que os modelos de ajuste obtidos, do tipo logarítmico, apresentaram coeficientes de determinação R^2 bastante elevados. Isso indica que os mesmos podem ser extrapolados e utilizados para previsão da perda de peso acumulada de ambas as misturas considerando períodos de cura mais longos, desde que respeitadas as condições iniciais simuladas nessa pesquisa.

Por fim, o autor gostaria de destacar que a avaliação da perda de peso ao longo do tempo foi motivada pelo trabalho anterior realizado por Orosa *et al.* (2022b), no qual os pesquisadores acompanharam por um longo período (0 a 60 dias) a evaporação da água em misturas a frio estabilizadas com diferentes teores de água e emulsão curadas a temperatura ambiente. Uma das conclusões apontadas por esse estudo foi que as maiores taxas de evaporação ocorreram dentro dos primeiros sete dias de cura. O trabalho de Graziani *et al.* (2016), ao monitorar a perda de umidade de corpos de prova para um intervalo de 0 até 100 dias, também encontrou uma tendência de desempenho similar. Isso consolida o comentário anterior aqui realizado, enfatizando que o processo de cura inicial dos materiais tipo BSM não deve ser negligenciado, e que o seu comportamento resiliente deve ser muito bem compreendido pelos projetistas do setor rodoviário.

6.5.4 Modelagem do comportamento resiliente das misturas

A fim de avaliar qual o modelo de ajuste mais indicado para caracterizar o comportamento resiliente dos materiais tipo BSM, os resultados obtidos nos ensaios foram ajustados de acordo com três modelos, sendo eles: $k-\sigma_3$, Hicks (1970) e Uzan *et al.* (1992). Esses modelos já foram apresentados anteriormente no capítulo 4. A tabela 25 exhibe os parâmetros obtidos para cada um dos modelos bem como os coeficientes de determinação R^2 alcançados. Vale destacar que os parâmetros de regressão do modelo de Uzan *et al.* (1992) foram determinados utilizando-se a ferramenta “*solver*” do software excel, sendo que os parâmetros aqui apresentados foram aqueles que promoveram a minimização do somatório dos erros quadráticos.

Tabela 25 - Parâmetros de regressão e coeficiente de determinação R^2 para os diferentes modelos de ajuste.

Mistura	Tipo de cura	Modelo de ajuste		
		$k-\sigma_3$: $MR=k_1.\sigma_3^{k_2}$	Hicks (1970): $MR=k_1.\theta^{k_2}$	Uzan <i>et al.</i> (1992): $MR=k_1.\theta^{k_2}.\sigma_d^{k_3}$
60%BGS_40%RAP	Controlada (SABITA, 2020)	k_1 : 4.068,83 k_2 : 0,5053 R^2 : 0,9752	k_1 : 1.774,59 k_2 : 0,4867 R^2 : 0,9405	k_1 : 1.428,29 k_2 : 0,6716 k_3 : -0,2028 R^2 : 0,9904
	Estendida (14 dias)	k_1 : 3.669,55 k_2 : 0,4411 R^2 : 0,9731	k_1 : 1.768,20 k_2 : 0,4204 R^2 : 0,9216	k_1 : 1.430,16 k_2 : 0,6357 k_3 : -0,2162 R^2 : 0,9873
80%BGS_20%RAP	Controlada (SABITA, 2020)	k_1 : 4.239,85 k_2 : 0,4778 R^2 : 0,9803	k_1 : 1.933,66 k_2 : 0,4600 R^2 : 0,9461	k_1 : 1.586,82 k_2 : 0,6467 k_3 : -0,1941 R^2 : 0,9922
	Estendida (14 dias)	k_1 : 3.920,09 k_2 : 0,4279 R^2 : 0,9744	k_1 : 1.933,28 k_2 : 0,4089 R^2 : 0,9222	k_1 : 1.578,03 k_2 : 0,6113 k_3 : -0,2049 R^2 : 0,9865

Fonte: elaborado pelo autor.

Pela análise da tabela 25 é possível concluir que o modelo de Hicks (1970) alcançou os piores coeficientes de determinação R^2 , obtendo um valor médio de 0,9326. Dessa forma, é possível afirmar que as estimativas para o módulo de resiliência por ele previstas terão uma menor precisão quando comparadas aos demais ajustes analisados. Orosa *et al.* (2022b) citam que o modelo de Hicks é bastante útil por sua simplicidade, mas que o comportamento resiliente dos materiais tipo BSM não pode ser adequadamente estimado apenas em função do somatório das tensões principais. Os resultados obtidos nessa pesquisa reafirmam essa característica.

Já os modelos $k-\sigma_3$ e Uzan *et al.* (1992) alcançaram, respectivamente, valores médios de R^2 iguais a 0,9758 e 0,9891. Dessa forma, é possível afirmar que o comportamento resiliente das misturas estudadas pode ser representado satisfatoriamente por ambos os ajustes, destacando-se que o modelo de Uzan *et al.* (1992) foi aquele que aproximou de forma mais exata os resultados reais com as estimativas previstas. Isso evidencia que a rigidez dos materiais tipo BSM também é influenciada pelas tensões desvio (σ_d) aplicadas e que elas devem ser consideradas ao se avaliar o comportamento resiliente de misturas a frio estabilizadas com emulsão. Nazarian *et al.* (2003) *apud* Meneses (2022) destaca que o modelo de Pezo (1993), o qual correlaciona o módulo de resiliência com as tensões σ_3 e σ_d , é o mais adotado por agências e instituições para representar o comportamento não linear dos materiais em projetos de pavimentos flexíveis. Essa afirmação destaca, mais uma vez, a importância em se considerar as tensões desvio quanto a não linearidade dos módulos resilientes.

Um último comentário diz respeito aos coeficientes k_1 e k_2 obtidos. Cabe salientar que quando a tensão desvio foi considerada de forma explícita (modelo de Uzan), a constante k_1 foi reduzida enquanto k_2 sofreu um acréscimo. Essa tendência já foi observada em alguns estudos anteriores desenvolvidos com misturas a frio (EBELS, 2008; SANTAGATA *et al.*, 2010; OROSA *et al.*, 2022b).

6.6 VERIFICAÇÃO ADICIONAL DA DOSAGEM DAS MISTURAS

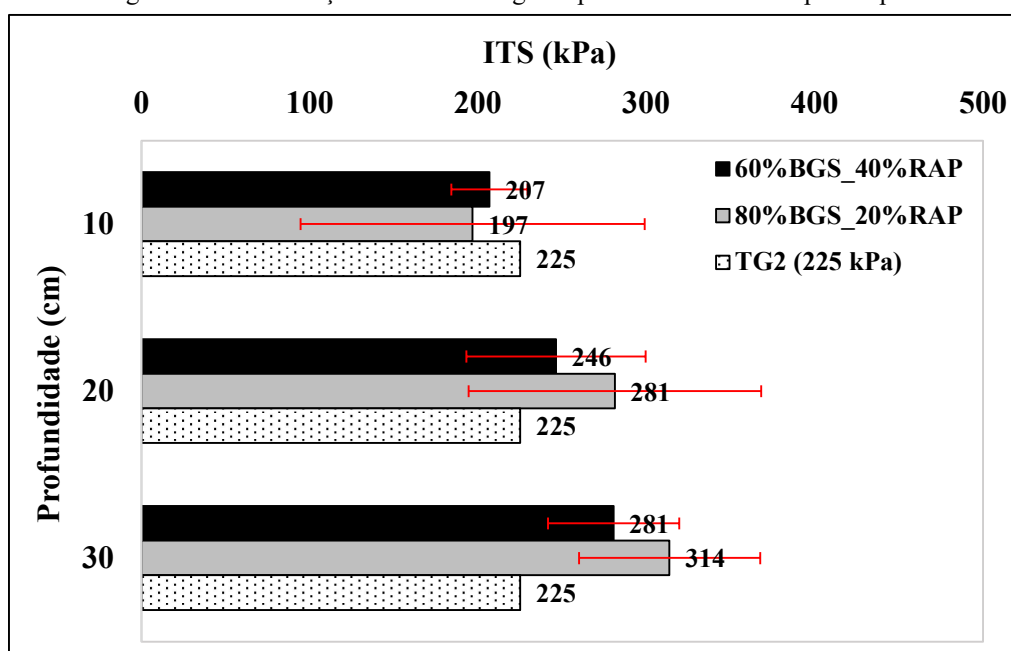
Este item discorre sobre os resultados alcançados, por ambas as misturas, na fase de verificação adicional da dosagem. Inicialmente, é apresentado o perfil de distribuição da ITS em função da profundidade dos corpos de prova e, em um segundo momento, a variação do índice de vazios ($e\%$). Por fim, são exibidas as correlações obtidas entre a ITS e o parâmetro $e\%$. Vale relembrar que os ensaios ITS foram realizados nos corpos de prova oriundos do processo de serragem.

6.6.1 Variação da resistência à tração indireta (ITS) ao longo do perfil dos corpos de prova

A figura 52 exibe a distribuição do parâmetro ITS ao longo da profundidade dos corpos de prova. O perfil apresentado corresponde à média dos valores obtidos, considerando o rompimento dos 24 corpos de prova oriundos do processo de serragem. Aqui, cabe mais uma vez destacar que o procedimento de corte foi realizado nos corpos de prova 15x30 cm, após os

mesmos terem sido submetidos ao ensaio triaxial de módulo de resiliência. Dessa maneira, foram originados “novos” corpos de prova com dimensões aproximadas de 15x10 cm. Para fins de comparação, foi inserido o valor mínimo da ITS preconizado pelo TG2, considerando o processo de cura seca. Como é possível observar, apenas o terço médio superior não alcançou o patamar mínimo recomendado.

Figura 52 - Distribuição da ITS ao longo da profundidade dos corpos de prova.



Fonte: elaborado pelo autor.

É possível verificar que existe uma tendência de aumento do parâmetro ITS com o acréscimo da profundidade. Os corpos de prova oriundos do terço superior alcançaram os menores valores, enquanto o terço inferior atingiu os resultados mais expressivos. Esse comportamento, seguido por ambas as misturas, pode ser explicado pelo fato de haver uma heterogeneidade na distribuição do índice de vazios na estrutura interna dos corpos de prova. Meneses (2022) refere que esse é um fenômeno a ser considerado quando a compactação é feita em camadas, caso do método vibratório empregado na presente pesquisa.

Kuchiishi (2019), ao apresentar imagens de tomografia computadorizada de um corpo de prova compactado pelo método vibratório, notou que a região mais superficial de cada camada atingiu menores $e\%$, sendo melhor densificada. Ainda, o autor percebeu que a camada mais superficial,

localizada no topo do corpo de prova, mostrou um maior $e\%$, enquanto aquela mais profunda alcançou menores $e\%$.

Os resultados obtidos vêm ao encontro das considerações feitas pelos autores citados pois, conforme já discutido, uma melhor densificação dos materiais promove um acréscimo no parâmetro ITS. Dessa forma, faz sentido que os corpos de prova do terço superior tenham obtido um pior desempenho, devido aos maiores $e\%$. Por outro lado, o terço inferior, em razão dos menores $e\%$, teve sua performance alavancada, resultando no perfil de distribuição da ITS recém ilustrado.

Percebe-se que a mistura 80%BGS_20%RAP apresentou uma variabilidade mais elevada nos resultados, fato que pode ser explicado em função da maior oscilação obtida nos graus de compactação dos corpos de prova 5 a 8 (vide tabela 31). Já a mistura com maior percentual de RAP, a qual alcançou densidades mais homogêneas para o seu conjunto de corpos de prova, apresentou uma menor dispersão nos valores de ITS. Ainda, é visível que a mistura 80%BGS_20%RAP atingiu um melhor desempenho, com exceção do terço superior (profundidade 0 a 10 cm). Mais uma vez, isso pode ser explicado pela melhor densificação promovida na mistura com menor percentual de RAP. Vale lembrar que, enquanto a mistura 60%BGS_40%RAP alcançou um grau de compactação médio de 100,38%, o conjunto de corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP obteve 102,97%, situação que justifica seu melhor desempenho.

Por fim, os valores médios de ITS, considerando os terços superior, médio e inferior foram 245 kPa e 264 kPa, respectivamente, para as misturas 60%BGS_40%RAP e 80%BGS_20%RAP. Essa constatação verifica, de forma adicional, que ambas as misturas conseguiram alcançar o parâmetro mínimo ITS_{seca} , igual a 225 kPa, estabelecido pelo TG2. Cabe a consideração de que o processo de serragem pode ter provocado danos e distúrbios significativos nos corpos de prova rompidos. Sendo assim, é bastante provável que, caso houvesse ocorrido uma nova moldagem com o martelo demolidor marca Bosch (modelo GSH 11 VC) para esse estágio da pesquisa, os valores obtidos seriam ainda maiores. Os resultados aqui apresentados confirmam, de certa forma, que aconteceu uma “superdosagem” na fase inicial da pesquisa, devido às baixas densidades alcançadas pelos corpos de prova.

6.6.2 Variação do índice de vazios (e%) ao longo do perfil dos corpos de prova

Para calcular o índice de vazios dos corpos de prova oriundos do processo de serragem, foi necessária a determinação da densidade máxima medida (G_{mm}) das misturas estudadas. A tabela 26 apresenta os resultados alcançados. Para fins de comparação, também foram inseridos alguns valores obtidos por outros pesquisadores para os parâmetros G_{mm} e e%.

Observa-se que os parâmetros G_{mm} e e% das misturas estudadas se encontram dentro da mesma faixa de variação (parte superior do intervalo) quando contrastadas com as demais pesquisas apresentadas na tabela acima. Cabe destacar que os dados mais confiáveis para fins de comparação são os do trabalho de Meneses (2022), haja vista o autor ter utilizado o mesmo método de compactação empregado nesse estudo, ou seja, o vibratório. Em todos os demais trabalhos, foram usadas outras metodologias na moldagem dos corpos de prova (giratório, Proctor, Marshall, estático, etc.).

Tabela 26 - Densidade máxima medida (G_{mm}) das misturas estudadas.

Características das misturas	Teor de emulsão	Referência	G_{mm} (g/cm ³)	e%
60%BGS_40%RAP	2,6%	Presente estudo	2,479	19,41%
80%BGS_20%RAP	3%	Presente estudo	2,508	17,89%
15%BGS_85%RAP	4%	Meneses (2022)	2,472	16,32%
30%CALCÁRIO_70%RAP	4%	Yang <i>et al.</i> (2021)	-	8 a 14,31%
22%BGS_30%CALCÁRIO_48%RAP	2 a 3,5% (espuma)	Iwanski e Chomicz-Kowalska (2013)	-	8 a 14,3%
100%RAP	2,5 a 4,2%	Orosa <i>et al.</i> (2021)	-	6 a 24%

Fonte: indicada.

Orosa *et al.* (2021) refere que não é usual as especificações recomendarem um intervalo de aceitação para o parâmetro e% e que, portanto, não existe um valor específico para tal propriedade nos métodos de dosagem atualmente existentes. Todavia, o autor destaca que para misturas do tipo CIR (“cold in-place recycling”), cuja reciclagem contempla apenas a camada de revestimento asfáltico, os valores encontrados em campo costumam variar entre 8% e 16%. Sendo assim, é possível constatar que os e% encontrados para os materiais do presente estudo são superiores aos usualmente encontrados nas misturas CIR.

Orosa *et al.* (2021) também cita que o aumento no teor de emulsão tende a provocar um decréscimo no índice de vazios. A comparação entre os resultados alcançados pelas misturas aqui estudadas e o trabalho de Meneses (2022) sugere essa tendência. Além disso, outro aspecto que contribuiu para que esse comportamento fosse observado diz respeito às maiores densidades alcançadas na compactação dos corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP, fazendo com que eles tenham atingido menores $e\%$.

Com relação ao parâmetro G_{mm} , vale salientar que os resultados aqui determinados ficaram muito próximos ao do material pesquisado por Meneses (2022). Também é possível constatar que a variação no conteúdo de emulsão parece não promover uma tendência clara de comportamento em se tratando da densidade máxima medida. Por outro lado, o acréscimo no conteúdo de RAP parece proporcionar uma redução na G_{mm} . Essa tendência de comportamento pode ser realçada ao se analisar de forma conjunta as densidades máximas medidas calculadas para as misturas dessa pesquisa com o material avaliado por Meneses (2022). Enquanto a mistura contendo 20% de RAP atingiu uma G_{mm} de 2,508 g/cm³, aquela com 85% (Meneses, 2022) alcançou uma G_{mm} de 2,472 g/cm³. Já o material composto por 40% de RAP, em um patamar intermediário, obteve uma G_{mm} de 2,479 g/cm³.

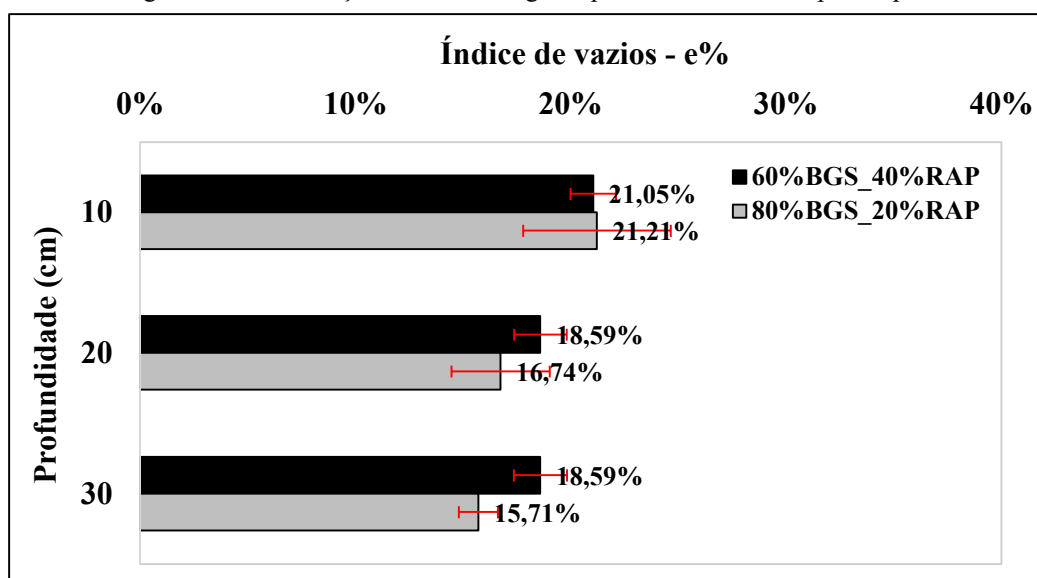
Yang *et al.* (2021) referem que os materiais tipo BSM, ao contrário do CBUQ, possuem a água como principal agente lubrificante durante o processo de compactação. Como a maior parcela dessa água evapora durante o processo de cura, essas misturas, ao endurecerem e aumentarem sua rigidez, acabam apresentando um teor de vazios muito elevado. Os autores ainda destacam que, devido a esse fato, as camadas recicladas podem sofrer uma compactação adicional durante a execução do revestimento superficial ou até mesmo pela ação do tráfego. Esse contexto sugere que as misturas da presente pesquisa deverão ter seu comportamento melhor compreendido quanto ao estudo das deformações permanentes as quais podem, desde já, serem indicadas como um provável mecanismo de falha desses materiais.

A figura 53 ilustra a distribuição do índice de vazios em função da profundidade dos corpos de prova, sendo que os valores expostos correspondem à média dos resultados obtidos. Conforme pode ser observado, para ambas as misturas existe uma tendência de redução no índice de vazios com o aumento da profundidade. Essa heterogeneidade na distribuição do $e\%$ ratifica os comentários feitos por Kuchiishi (2019) pois, de fato, os corpos de prova provenientes dos terços médios inferiores alcançaram as maiores densidades, resultando em menores $e\%$. Já as

camadas mais superficiais, localizadas no terço médio superior, atingiram as menores densidades e, conseqüentemente, os e% calculados foram maiores.

Ao se comparar as duas misturas, é possível verificar que aquela com maior conteúdo de RAP obteve um pior desempenho, ou seja, maiores e%. Essa ocorrência pode ser esclarecida pelo fato de os corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP terem alcançado os maiores graus de compactação. Com relação a variabilidade dos resultados, percebe-se que a mistura 80%BGS_20%RAP apresentou uma maior dispersão. Isso pode ser explicado pelas maiores oscilações obtidas (desvio padrão) nos graus de compactação desse conjunto de corpos de prova. Como o grupo da mistura 60%BGS_40%RAP apresentou densidades mais homogêneas, a determinação do índices de vazios também seguiu essa tendência.

Figura 53 - Distribuição do e% ao longo da profundidade dos corpos de prova.



Fonte: elaborado pelo autor.

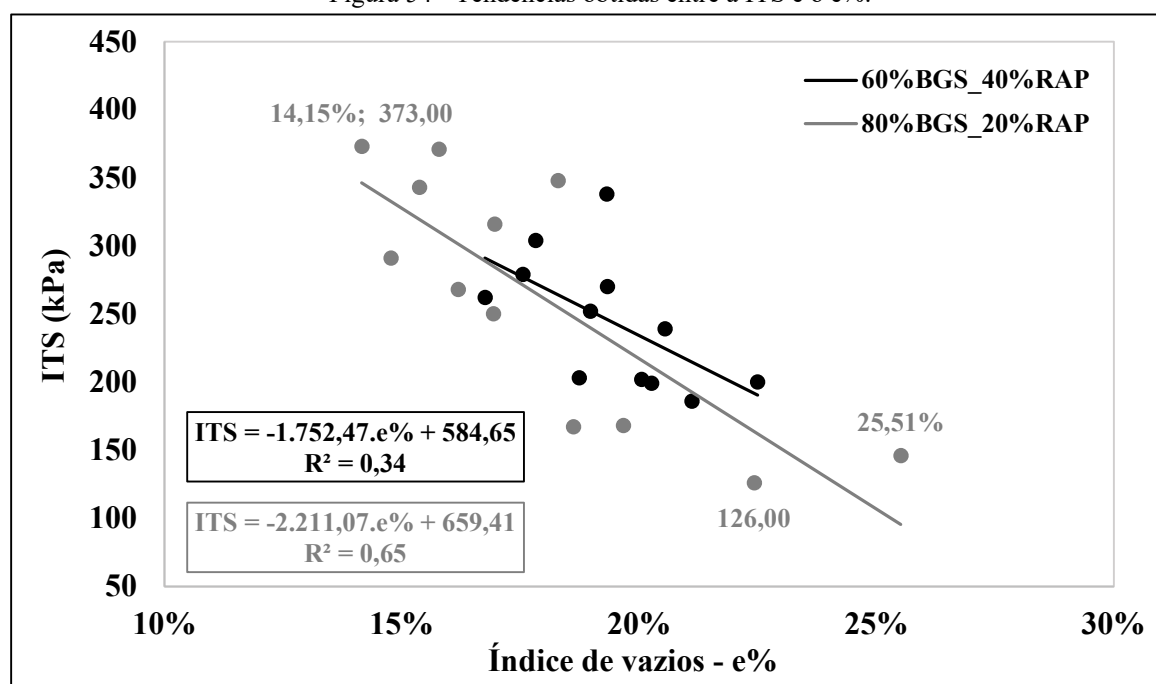
6.6.3 Resistência à tração indireta (ITS) versus índice de vazios (e%)

Na figura 54 são exibidas as tendências obtidas entre a resistência à tração indireta (ITS) e o índice de vazios (e%). Foram plotados os resultados dos 24 corpos de prova rompidos nessa etapa da pesquisa (doze para cada mistura).

Pela análise da figura 54, é possível observar que ambas as misturas apresentaram uma tendência de queda no parâmetro ITS com o aumento do e%. Salienta-se que o estudo de Yang *et al.* (2021) obteve esse mesmo comportamento. Percebe-se que a mistura 60%BGS_40%RAP

alcançou, para um mesmo índice de vazios, valores de ITS mais elevados, confirmando o melhor desempenho desse material frente a esse parâmetro. De acordo com o que já foi discutido, a mistura com maior percentual de RAP possui um conteúdo mais elevado de ligante oxidado em sua composição e, considerando que a emulsão aplicada nessa pesquisa consegue recuperar de forma parcial as propriedades viscoelásticas desse ligante, é bastante compreensível o seu melhor desempenho.

Figura 54 - Tendências obtidas entre a ITS e o e%.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os valores máximos e mínimos do parâmetro ITS foram, respectivamente, 373 kPa e 126 kPa, enquanto os e% calculados ficaram entre 25,51% e 14,15%. Esses resultados foram obtidos pela mistura 80%BGS_20%RAP. Considerando que as maiores densidades foram alcançadas pelos corpos de prova dessa mistura, justifica-se os menores e% e, conseqüentemente, as maiores ITS. Apenas para exemplificar, o ponto localizado mais acima e a esquerda da figura 67 (e% = 14,15% e ITS = 373 kPa) foi resultado do rompimento de um dos terços procedentes do corpo de prova número 5, o qual obteve um grau de compactação de 104,15%, o mais elevado entre todos os confeccionados. Já a menor ITS (126 kPa) foi alcançada pelo terço superior originado do corpo de prova número 6, o qual apresentou o pior grau de compactação (101,86%) para o conjunto da mistura 80%BGS_20%RAP. Esse fato, por si só, já poderia

justificar o pior desempenho. De forma adicional, também foi possível perceber que o terço superior em questão apresentou uma insuficiência de finos, circunstância que também afeta de forma negativa o parâmetro ITS.

Por fim, cabe destacar que a mistura 60%BGS_40%RAP obteve valores de $e\%$ mais homogêneos. Essa situação pode ser explicada pela menor variação obtida nas densidades dos corpos de prova desse grupo, fazendo com que a dispersão nos índices de vazios calculados fosse reduzida.

Yang *et al.* (2021) referem que a diminuição do índice de vazios é uma maneira eficiente de aumentar a resistência à tração indireta dos materiais tipo BSM. Os resultados obtidos nessa pesquisa reforçam essa afirmação.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões deduzidas a partir do programa experimental executado nesse estudo. Também são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

7.1 CONCLUSÕES

O objetivo geral da presente pesquisa, que consistiu na determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade – coesão, ângulo de atrito interno e módulo de resiliência – de duas misturas estabilizadas com emulsão asfáltica para emprego em pavimentos flexíveis foi cumprido. O desenvolvimento do programa experimental também permitiu avaliar a aplicabilidade da metodologia de dosagem proposta pelo TG2 (SABITA, 2020). Apesar das dificuldades encontradas na fase inicial da pesquisa, mais especificamente na moldagem dos corpos de prova para determinação da resistência à tração indireta, é possível concluir que o referido método de dosagem pode ser aplicado a nível nacional, de forma satisfatória, nos materiais tipo BSM brasileiros.

Com relação aos objetivos específicos, eles também foram cumpridos. O processo de dosagem das misturas foi realizado e o seu desempenho em termos de resistência à tração indireta foi avaliado. Foram determinados os parâmetros de cisalhamento (coesão e ângulo de atrito interno) e foi avaliada a influência de dois tempos de cura distintos no módulo de resiliência dos materiais.

Abaixo são destacadas as principais conclusões relativas aos diferentes assuntos abordados nesse trabalho, levando-se em consideração os ensaios constantes no programa experimental.

Quanto ao método de compactação vibratório:

- a) Na etapa inicial da pesquisa, houve dificuldades para promover a densificação adequada dos materiais. O martelo demolidor empregado da marca Bosch, modelo GSH 500, com uma potência nominal de 1100 W e uma energia de impacto de 7,5 J por golpe parece, dessa forma, não ser indicado para compactação de materiais similares aos desse estudo;
- b) Em um segundo momento, as misturas passaram a ser compactadas por um martelo demolidor da marca Bosch, modelo GSH 11 VC, com uma potência nominal de 1700 W e uma energia de impacto de 23 J por golpe. A partir desse

momento, as densidades obtidas no ensaio Proctor foram atingidas. Sendo assim, esse é o modelo de equipamento que deve ser empregado na compactação de misturas com características semelhantes às dessa pesquisa;

- c) Existe uma variabilidade inerente no processo de compactação vibratória, a qual é difícil de ser eliminada. Considerando que o operador do equipamento trabalhe com extrema atenção durante a moldagem dos corpos de prova, ainda assim, serão observadas dispersões nas densidades obtidas. Apesar de o método de compactação aplicado em campo ser do tipo vibratório, o autor gostaria de destacar que, do ponto de vista exclusivamente laboratorial, a compactação giratória tende a resultar em uma menor variabilidade na etapa de moldagem, haja vista o monitoramento contínuo da altura e densidade dos corpos de prova realizado pelo equipamento giratório;
- d) A mistura 80%BGS 20%RAP foi compactada com menor dificuldade e alcançou maiores densidades para um mesmo tempo de vibração. Essa circunstância talvez possa ser explicada pela quantidade ligeiramente menor de agregados graúdos em sua granulometria. De forma adicional, na fase final do estudo, o teor de emulsão incorporado a esse material foi mais elevado, situação que tende a promover uma redução no seu índice de vazios.

Quanto à resistência à tração indireta (ITS):

- a) Ambas as misturas conseguiram alcançar os valores mínimos preconizados pelo TG2 podendo, dessa forma, ser classificadas como materiais do tipo BSM1. Essa situação foi verificada para as duas condições de cura;
- b) A mistura 60%BGS 40%RAP obteve os maiores valores. Isso pode ser explicado pela maior quantidade de ligante oxidado existente nesse material. Considerando que a emulsão incorporada promove a reativação parcial desse ligante, fazendo com que suas propriedades viscoelásticas sejam restauradas, justifica-se tal comportamento;
- c) Parece ter havido uma “superdosagem” das misturas, ou seja, os teores de emulsão de projeto selecionados poderiam ter sido menores. Sabe-se que a densificação dos corpos de prova na etapa inicial da pesquisa foi insuficiente, comprometendo o desempenho de ambas as misturas. Sendo assim, considerando a situação hipotética em que as densidades obtidas no ensaio Proctor tivessem sido alcançadas, o comportamento das misturas teria sido alavancado e, dessa maneira, os teores de emulsão selecionados seriam reduzidos.

Quanto à resistência ao cisalhamento (c e ϕ):

- a) Apenas a mistura 60%BGS_40%RAP conseguiu atingir o valor mínimo preconizado pelo TG2 para o ângulo de atrito interno. A “superdosagem” citada anteriormente pode ter colaborado para esse cenário. Diversas pesquisas relatam que a incorporação de maiores teores de emulsão tende a provocar uma redução no ângulo de atrito interno, devido à lubrificação das partículas, fazendo com que o atrito e o intertravamento entre as mesmas sejam reduzidos;

- b) Com relação à coesão, ambas as misturas conseguiram alcançar o patamar mínimo determinado pelo TG2. Sabe-se que essa propriedade é diretamente influenciada pela quantidade de emulsão incorporada aos materiais. Os elevados valores de coesão obtidos reforçam o argumento de que pode ter ocorrido uma “superdosagem” devido à densificação deficiente das misturas;
- c) É possível afirmar que a mistura 60%BGS_40%RAP pode ser categorizada como um material classe BSM1. Já a mistura 80%BGS_20%RAP, devido ao seu baixo ângulo de atrito interno, não conseguiu alcançar tal classificação.

Quanto ao módulo de resiliência:

- a) Os valores de módulo de resiliência alcançados por ambas as misturas, quando comparados aos demais materiais comumente empregados nas camadas dos pavimentos nacionais, foram superiores. Esse aspecto destaca que as misturas estudadas podem ser empregadas na restauração de pavimentos, e que a aplicação da técnica de reciclagem do tipo FDR pode gerar camadas com comportamento resiliente adequado;
- b) A mistura 80%BGS_20%RAP apresentou uma maior rigidez. Esse resultado corrobora o comportamento observado em pesquisas anteriores, nas quais a incorporação de maiores teores de RAP fez com que os materiais se tornassem mais elásticos;
- c) Maiores períodos de cura possibilitaram um aumento no módulo de resiliência dos materiais. Isso pode ser explicado pelo processo de evaporação da água e cura da emulsão. De forma adicional, estudos comprovam que menores teores de umidade resultam em maiores valores de sucção, contribuindo também para o aumento observado na rigidez das misturas. O processo de hidratação do cimento também pode ter contribuído para esse cenário. Considerando que os corpos de prova apresentaram conteúdos de água não desprezíveis para ambas as condições de cura, é possível que a hidratação do cimento por um maior período tenha alavancado o comportamento resiliente dos materiais;
- d) O monitoramento da perda de peso em função do tempo permite concluir que a taxa de evaporação da água é mais elevada ao longo dos primeiros dias de cura. Passado o período inicial, geralmente até o sétimo dia, a taxa de evaporação e a perda de peso tendem a ocorrer de forma mais lenta. Outras pesquisas relatam que o módulo de resiliência de alguns materiais pode apresentar tendência de crescimento mesmo após períodos de cura relativamente longos (60 dias). Os modelos de ajuste obtidos, do tipo logarítmico, alcançaram coeficientes de determinação R^2 bastante elevados, podendo ser utilizados para prever a evaporação de água das misturas, desde que respeitadas as mesmas condições de cura aqui aplicadas;
- e) Quanto a interpretação dos resultados, o modelo de Hicks (1970) obteve os piores coeficientes de determinação R^2 , indicando que a rigidez das misturas não pode ser considerada apenas como uma função do somatório das tensões principais (θ). Já os modelos de Uzan *et al.* (1992) e $k-\sigma_3$ proporcionaram bons ajustes, confirmando algumas pesquisas já realizadas que estudaram a modelagem do comportamento resiliente de materiais tipo BSM;

- f) Ambas as misturas apresentaram um comportamento resiliente não linear, ou seja, seu módulo de resiliência é influenciado diretamente pelo estado de tensões atuante na camada reciclada.

Quanto a etapa de verificação adicional da dosagem das misturas:

- a) Os valores de resistência à tração indireta obtidos confirmaram que os teores de emulsão selecionados conseguiram promover, de fato, o desempenho mínimo preconizado pelo TG2;
- b) O processo de serragem realizado nos corpos de prova 15x30cm permitiu comprovar que existe uma tendência de crescimento da resistência à tração indireta com o aumento da profundidade. Isso indica que existe uma heterogeneidade considerável na estrutura interna de um mesmo corpo de prova, situação que pode afetar diversas propriedades do material;
- c) Foi constatado que quando o corpo de prova é confeccionado em diversas camadas, o método de compactação vibratório faz com que aquelas localizadas a maiores profundidades alcancem um menor índice de vazios quando comparadas as camadas mais superficiais. Isso reforça, mais uma vez, a heterogeneidade existente dentro de um mesmo corpo de prova. Estudos recentes indicavam essa tendência que foi, de fato, aqui comprovada;
- d) Existe uma tendência de queda da resistência à tração indireta com o acréscimo do índice de vazios. Os resultados obtidos nessa pesquisa permitiram mapear esse comportamento e, dessa maneira, é possível afirmar que a redução do índice de vazios é uma opção a ser considerada quando o aumento da resistência à tração indireta dos materiais tipo BSM for pretendido;
- e) As misturas dessa pesquisa apresentaram um índice de vazios que pode ser considerado elevado. Dessa forma, um projeto de restauração contemplando o uso desse tipo de material deve prever uma análise de desempenho bastante robusta levando-se em consideração possíveis problemas relativos às deformações permanentes. Diversos trabalhos afirmam que esse é o principal mecanismo de falha dos materiais aqui estudados.

7.2 SUGESTÕES

A fim de aprofundar os estudos desenvolvidos nessa dissertação e colaborar para uma melhor compreensão da técnica de reciclagem tipo FDR considerando a incorporação de emulsão asfáltica nas camadas recicladas, são elencadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) Essa pesquisa incorporou apenas um material de base comumente utilizado nas rodovias brasileiras, a brita graduada simples. Dessa maneira, recomenda-se que outros materiais empregados nas camadas de base e sub-base de pavimentos brasileiros também sejam estudados, aplicando-se metodologias de dosagem semelhantes ao TG2;

- b) O RAP utilizado nessa dissertação foi caracterizado de forma bastante simples sendo determinada, basicamente, a sua granulometria. Uma sugestão é que estudos futuros consigam avaliar a influência da incorporação de diferentes tipos de RAP nas diversas propriedades aqui analisadas, inclusive nos teores de emulsão resultantes do processo de dosagem. Por exemplo, poderão ser acrescentados RAP com diferentes teores de ligante oxidado em sua composição ou, ainda, com ligantes asfálticos modificados por polímeros, borracha de pneus, dentre outros;
- c) Essa dissertação não contemplou a execução de ensaios triaxiais de deformação permanente. Sendo assim, sugere-se que tais experimentos sejam realizados nos mesmos materiais aqui estudados, visando uma melhor compreensão do seu desempenho no tocante a esse mecanismo de falha;
- d) Buscando avaliar o desempenho dos materiais em campo, recomenda-se a construção e o monitoramento de trechos e/ou pistas experimentais. Assim, será possível analisar os principais mecanismos de falha e degradação aos quais as misturas estudadas estão submetidas;
- e) Objetivando uma melhor compreensão da evolução da rigidez, propõe-se a realização de ensaios triaxiais de módulo de resiliência para maiores períodos de cura. A análise de corpos de prova curados à temperatura ambiente parece interessante, haja vista ser a condição a qual os materiais *in situ* estarão submetidos. Ainda, por ser um ensaio não destrutivo, o emprego de um mesmo corpo de prova para diferentes períodos de cura deve ser avaliado;
- f) Sugere-se o dimensionamento M-E de um pavimento considerando em sua estrutura as misturas estudadas nessa dissertação. Poderão ser feitas análises de previsão de desempenho levando-se em consideração os diversos modelos existentes na literatura. Cálculos referentes a aspectos econômicos, ambientais, análise do ciclo de vida, dentre outros, também podem ser considerados;
- g) No intuito de avaliar o efeito da temperatura nos materiais aqui estudados, recomenda-se a realização de ensaios triaxiais de deformação permanente e módulo de resiliência em diferentes temperaturas, considerando a amplitude térmica em que os materiais estão submetidos em campo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2850**: Standard Test Method for Unconsolidated-undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. West Conshohocken, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3203/D3203M - 17**: Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Asphalt Mixtures. West Conshohocken, 2017.

ANDRADE, L.R. **Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado**. 2017. 179 p. Thesis (Master in Transportations Engineering), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. **Recommended Construction Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Bituminous Stabilization**. FDR101, 2017. Disponível em: <https://www.arra.org/page/guideline>. Acesso em: 19 jul. 2021.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. **Recommended Mix Design Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent**. FDR201A, 2018. Disponível em: <https://www.arra.org/page/guideline>. Acesso em: 27 mai. 2021.

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

_____. **NBR 6299:2012**: Emulsões asfálticas – Determinação do pH. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14393:2012**: Emulsões asfálticas – Determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 6567:2015**: Ligantes asfálticos – Emulsões asfálticas – Determinação da carga de partícula. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 6570:2016**: Ligantes asfálticos – Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 9895:2017**: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 14376:2019**: ligantes asfálticos – Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas – Métodos expeditos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7182:2020**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2020.

AUSTROADS. **Mix design for stabilised pavement materials: Austroads Publication AP-T16**. Sydney, 43p. 2002.

_____. **Guide to Pavement Technology Part 4D: Stabilised Materials**. Sydney, 65p. 2019.

BOCCI, M.; GRILLI, A.; CARDONE, F.; FERROTTI, G. **Full-depth reclamation for the rehabilitation of local roads: a case study**. International Journal of Pavement Engineering (2014), 15:3, 191-201. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.657196>.

CASTRO, L. N. **Reciclagem a frio *in situ* com espuma de asfalto**. Rio de Janeiro, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 156p.

DAVID, Daniela de. **Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado**. 2006. 117p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **Pavimentação: Reciclagem de pavimento “*in situ*” com espuma de asfalto**. DER/PR ES-P 32/05. Curitiba, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Reciclagem *in situ* a Frio com Espuma de Asfalto**. DER/SP ET-DE-P00/033. São Paulo, 2006.

_____. **Reciclagem de Pavimento Asfáltico *in situ* com Emulsão**. DER/SP ET-DE-P00/034. São Paulo, 2006.

_____. **Reciclagem de Pavimento Asfáltico em Usina com Adição de Espuma de Asfalto**. DER/SP ET-DE-P00/049. São Paulo, 2020.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Pavimentação: Reciclagem Profunda de Pavimentos**. DEINFRA/SC ES-P 09/16. Florianópolis, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – análise granulométrica**. DNER-ME 083/98. Rio de Janeiro, 5 p. 1998.

_____. **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. DNER-ME 035/98. Rio de Janeiro, 6 p. 1998.

_____. **Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**. DNER-ME 195/97. Rio de Janeiro, 6 p. 1997.

_____. **Equivalente de areia**. DNER-ME 054/97. Rio de Janeiro, 10 p. 1997.

_____. **Solos – determinação do limite de plasticidade**. DNER-ME 082/94. Rio de Janeiro, 3 p. 1994.

_____. **Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio**. DNIT 424/2020-ME. Rio de Janeiro, 9 p. 2010.

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

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

_____. **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio.** DNIT 427/2020-ME. Rio de Janeiro, 9 p. 2020.

_____. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.** DNIT 136/2018-ME. Rio de Janeiro, 9 p. 2018.

_____. **Pavimentação – Reciclagem de pavimento a frio “in situ” com adição de espuma de asfalto – Especificação de Serviço.** DNIT 166/2013-ES. Rio de Janeiro, 9 p. 2013.

_____. **Pavimentação – Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto – Especificação de Serviço.** DNIT 169/2014-ES. Rio de Janeiro, 11 p. 2014.

_____. **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.** DNIT 164/2013-ME. Rio de Janeiro, 7 p. 2013.

DIEFENDERFER, B. K.; APEAGYEI, A. K. **Analysis of Full-Depth Reclamation Trial Sections in Virginia.** Final Report VCTIR 11-R23. Virginia Center for Transportation Innovation & Research. Charlottesville, Virginia. 2011. Disponível em: http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/11-r23.pdf. Acesso em: 29 jul. 2021.

EBELS, L. J. **Characterisation of Material Properties and Behavior of Cold Bituminous Mixtures for Road Pavements.** 2008. 440 p. Ph.D. Dissertation (Engineering), Stellenbosch University, South Africa, 2008.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **Asphalt in figures 2020.** 2021, 13 p. Disponível em: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-archive/>. Acesso em: 4 ago. 2022.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland: definição das bases para um método de dosagem.** 2015. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2015.

GÓMEZ-MEIJIDE, B.; PÉREZ, I. **Nonlinear elastic behavior of bitumen emulsion-stabilized materials with C&D waste aggregates.** Construction and Building Materials 98, 853-863. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.004>. Acesso em: 23 ago. 2022.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do baixo Jaguaribe/estado do Ceará.** 2008. 248 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.

GRAZIANI, A.; GODENZONI, C.; CARDONE, F.; BOCCI, M. **Effect of curing on the physical and mechanical properties of cold-recycled bituminous mixtures.** *Materials and Design* 95, 358-369. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.094>. Acesso em: 23 ago. 2022.

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* 173, 754-762. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.091>. Acesso em: 25 ago. 2022.

GRECA ASFALTOS. **Portfólio de produtos.** [2021?]. 36 p. Disponível em: <https://www.grecaasfaltos.com.br/wp-content/conteudos/catalogo-produtos-greca-asfaltos-web.pdf>. Acesso em: 30 set. 2022.

GRILLI, A.; GRAZIANI, A.; BOCCI, E.; BOCCI, M. **Volumetric properties and influence of water content on the compactability of cold recycled mixtures.** *Materials and Structures* 49: 4349-4362. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0792-x>. Acesso em: 23 ago. 2022.

GUATIMOSIM, F. V. **Mechanical Behavior and Structural Performance of Recycled Foamed Bitumen.** 2015. 127 p. Master Thesis (Engineering), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GUATIMOSIM, F. V.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L. L. B. **Structural evaluation of cold recycling mixture with foamed asphalt.** 2017. 10^a International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields – BCRRA – 2017. Athens. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318886216_Structural_evaluation_of_cold_recycling_mixture_with_foamed_asphalt. Acesso em: 19 ago. 2022.

GUATIMOSIM, F. V.; VASCONCELOS, K.; KUCHIISHI, A. K.; BERNUCCI, L. L. B. **Field Evaluation of High Level Roads with Foamed Bitumen Stabilized Base Layers.** 2019. International Airfield and Highways Pavements Conference 2019. Chicago, Illinois. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/9780784482469.055>. Acesso em: 19 ago. 2022.

HICKS, R. G. **Factors influencing the resilient response of granular materials.** Doctoral Dissertation. University of California, Berkeley, USA. 1970.

IWANSKI, M.; CHOMICZ-KOWALSKA, A. **Laboratory Study on Mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology.** *Procedia Engineering* 57: 433-442. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.056>. Acesso em: 23 ago. 2022.

JENKINS, K. J.; GREYLING, A. H.; COLLINGS, D. C. **Bitumen Stabilization of Base Layers for Pavement Rehabilitation Reaches Greater Heights.** 2021. International Airfield and Highway Pavements Conference 2021. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784483510.024>. Acesso em: 29 jul. 2021.

KÉZDI, A. **Stabilized Earth Roads – Developments in Geotechnical Engineering.** Elsevier Company, 1979.

KUCHIISHI, A. K. **Mechanical Behavior of Cold Recycled Asphalt Mixtures**. 2019. 191 p. Master Thesis (Engineering), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. 1969. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley. 553 p.

MALYSZ, R. **Comportamento Mecânico de Britas Empregadas em Pavimentação**. 2004. 166 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, 2004.

MALYSZ, R. **Desenvolvimento de um Equipamento Triaxial de Grande Porte para Avaliação de Agregados Utilizados como Camada de Pavimentos**. 2009. 301 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, 2009.

MENESES, J. P. C. **Contributions to the Mix Design and Mechanical Behavior of Emulsion Stabilized Cold Recycled Asphalt Mixtures**. 2022. 158 p. Unpublished Master's Thesis (Engineering), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

MINISTRY OF DEVELOPMENT. 2017. Recycling of bituminous pavements and roadways. Circular Order 40/2017. In Spanish.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2019**. Information Series 138 (10th edition). 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/344252166>. Acesso em: 4 ago. 2022.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Proposed AASHTO Practice and Tests for Process Control and Product Acceptance of Asphalt-Treated Cold Recycled Pavements**. NCHRP Research Report 960. Transportation Research Board. Washington DC, 2021.

NUNES, M. G. F. **Reciclagem de Pavimentos “in situ” a Frio com Emulsão Betuminosa – A Experiência Portuguesa**. 2008. 162 p. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.21/389>. Acesso em: 4 ago. 2022.

OROSA, P.; PASANDÍN, A. R.; PÉREZ, I. **Assessment of two laboratory design methods for CIR mixtures with Bitumen emulsion based on static and gyratory compaction**. Construction and Building Materials 265, 120667. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120667>. Acesso em: 23 ago. 2022.

OROSA, P.; PASANDÍN, A. R.; PÉREZ, I. **Compaction and volumetric analysis of cold in-place recycled asphalt mixtures prepared using gyratory, static, and impact procedures**. Construction and Building Materials 296, 123620. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123620>. Acesso em: 23 ago. 2022.

OROSA, P.; PÉREZ, I.; PASANDÍN, A.R. **Evaluation of the shear and permanent deformation properties of cold in-place recycled mixtures with bitumen emulsion using triaxial tests**. Construction and Building Materials 328, 127054. 2022a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127054>. Acesso em: 14 mar. 2022.

OROSA, P.; PÉREZ, I.; PASANDÍN, A.R. **Short-term resilient behaviour and its evolution with curing in cold in-place recycled asphalt mixtures**. Construction and Building Materials 323, 126559. 2022b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126559>. Acesso em: 23 ago. 2022.

PÉREZ, I.; MEDINA, L.; GÓMEZ-MEIJIDE, B.; COSTA, P. A.; CARDOSO, A. S. **Numerical simulation of Bitumen emulsion-stabilised base course mixtures with C&D waste aggregates considering nonlinear elastic behaviour**. Construction and Building Materials 249, 118696. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118696>. Acesso em: 23 ago. 2022.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Guide to full-depth reclamation (FDR) with cement**. Report N° SR1006P, 2017.

SANTAGATA, E.; CHIAPPINELLI, G.; RIVIERA, P.P.; BAGLIERI, O. Triaxial Testing for the Short Term Evaluation of Cold-Recycled Bituminous Mixtures. Road Materials and Pavement Design vol. 11, 123-147. 2010. Disponível em: <http://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690263>. Acesso em: 23 ago. 2022.

SILVA, V. D. da. **Avaliação da deformação permanente de misturas estabilizadas com asfalto**. 2019. 81 p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

SOUTHERN AFRICAN BITUMEN ASSOCIATION. **Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials**. Third Edition. July, 2020.

SPECHT, L. P.; PIRES, G. M.; VITORELO, T.; HIRSH, F.; CRONST, F.; BERGMANN, E. C.; TIEFENSEE, M. D. **Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo**. Anais da 42ª Reunião Anual de Pavimentação. 2013. Gramado/RS, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/273980399>. Acesso em: 8 ago. 2022.

TANSKI, M. C. **Comportamento Mecânico de Material Reciclado a Frio com Emulsão e Cimento**. 2016. 169 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, RS, 2016.

UZAN, J.; WITCZAK, M. W.; SCULLION, T.; LYTTON, R. L. **Development and validation of realistic pavement response models**. 1992. Nottingham, UK.

WIRTGEN. **Reciclagem a frio: Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen**. Windhagen, Alemanha, 2012.

YANG, W.; OUYANG, J.; MENG, Y.; HAN, B.; SHA, Y. **Effect of curing and compaction on volumetric and mechanical Properties of cold-recycled mixture with asphalt emulsion under diferente cement contents**. Construction and Building Materials 297, 123699. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123699>. Acesso em: 23 jun. 2021.