



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANA LETÍCIA FEITOSA DE MACÊDO

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE REGENERAÇÃO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÓLEO DE ALGODÃO RESIDUAL
ENCAPSULADO**

CAMPINA GRANDE – PB

2025

ANA LETÍCIA FEITOSA DE MACÊDO

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE REGENERAÇÃO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÓLEO DE ALGODÃO RESIDUAL
ENCAPSULADO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof.^a Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Germano Tavares Marinho Filho.

CAMPINA GRANDE – PB

2025

M141a

Macêdo, Ana Leticia Feitosa de.

Avaliação da capacidade de regeneração de misturas asfálticas recicladas com óleo de algodão residual encapsulado / Ana Leticia Feitosa de Macêdo. – Campina Grande, 2025.

136 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2025.

"Orientação: Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena, Prof. Dr. Paulo Germano Tavares Marinho Filho".

Referências.

1. Misturas Asfálticas Recicladas. 2. Capacidade de Regeneração. 3. Agentes Rejuvenescedores. 4. Cápsulas. 5. Modelo Viscoelástico de Dano Contínuo Simplificado (S-VECD). I. Lucena, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes. II. Marinho Filho, Paulo Germano Tavares. III. Título.

CDU 625.85(043)

ANA LETÍCIA FEITOSA DE MACÊDO

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE REGENERAÇÃO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS RECICLADAS COM ÓLEO DE ALGODÃO RESIDUAL
ENCAPSULADO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Aprovada em 26/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCEI**
Data: 05/03/2025 12:47:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena (UFCG)
Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **PAULO GERMANO TAVARES MARINHO FILHO**
Data: 05/03/2025 16:03:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Germano Tavares Marinho Filho (UFCG)
Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **IURI SIDNEY BESSA**
Data: 06/03/2025 09:02:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Iuri Sidney Bessa (UFC)
Membro Externo

JONNY DANTAS
PATRICIO:07165586458

Assinado de forma digital por JONNY
DANTAS PATRICIO:07165586458
Dados: 2025.03.05 16:13:56 -03'00'

Prof. Dr. Jonny Dantas Patricio (UFCG)
Membro Interno

CAMPINA GRANDE – PB, 2025

DEDICATÓRIA

À minha família, por todo amor e apoio
incondicional.

RESUMO

A reciclagem de misturas asfálticas com Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) é uma solução sustentável para a pavimentação, entretanto a presença de ligante envelhecido pode comprometer a resistência à fadiga dessas misturas. Para mitigar esse efeito, agentes rejuvenescedores encapsulados podem ser incorporados a mistura asfáltica para intensificar a regeneração destes materiais. Como rejuvenescedor, foi utilizado óleo de algodão residual, proveniente da produção de ração animal produzida em larga escala. Seu reuso contribui para a sustentabilidade ao mitigar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado. Este estudo investigou a capacidade de regeneração de misturas asfálticas recicladas com a adição de rejuvenescedores encapsulados, utilizando o modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-VECD) para avaliar a recuperação do dano ao longo do tempo. As cápsulas foram produzidas em duas razões óleo/água para avaliar o impacto do teor de óleo no desempenho da regeneração. As misturas asfálticas foram produzidas com agregados virgens e RAP, além da incorporação das cápsulas, sendo caracterizadas mecanicamente por ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, dano por umidade induzida, deformação permanente e fadiga por compressão diametral. Para avaliar a regeneração da mistura foram realizados ensaios de fadiga à tração direta, e a análise foi conduzida utilizando o modelo S-VECD. Os resultados deste estudo indicam que a incorporação de agentes rejuvenescedores encapsulados, em misturas asfálticas recicladas, modificou suas propriedades mecânicas e sua resposta ao dano acumulado. A adição de RAP aumentou a rigidez das misturas, enquanto as cápsulas reduziram essa rigidez. O modelo S-VECD permitiu avaliar a progressão do dano e a integridade estrutural das misturas, revelando que a degradação foi mais lenta na mistura com menor teor de óleo. Os resultados indicaram que a regeneração das misturas com RAP e cápsulas foi semelhante à da mistura de referência, sugerindo que a liberação do rejuvenescedor encapsulado pode ter sido limitada sob as condições de ensaio. Conclui-se que, embora as cápsulas tenham modificado as propriedades mecânicas das misturas recicladas, seu efeito na regeneração nas condições deste estudo foi limitado.

Palavras-chave: Misturas asfálticas recicladas, regeneração, agentes rejuvenescedores, cápsulas, S-VECD.

ABSTRACT

Recycling asphalt mixtures with Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) represents a sustainable solution for pavement construction. However, the presence of aged binders can compromise the fatigue resistance of these mixtures. To reduce this effect, encapsulated rejuvenating agents can be incorporated into the binder to enhance the regeneration of these materials. This study used residual cottonseed oil, a byproduct of large-scale animal feed production, as a rejuvenator. Its reuse contributes to sustainability by mitigating the environmental impacts associated with improper disposal. This study investigated the regeneration capacity of recycled asphalt mixtures incorporating encapsulated rejuvenators, employing the S-VECD model to quantify damage recovery over time. The capsules, produced with residual cottonseed oil, were prepared in two oil-to-water ratios to assess the impact of oil content on regeneration performance. The asphalt mixtures, composed of virgin aggregates and RAP, incorporated the capsules and underwent mechanical characterization through tensile strength tests, resilient modulus evaluation, moisture-induced damage assessment, permanent deformation analysis, and diametral compression fatigue testing. To assess mixture regeneration, the study conducted direct tension fatigue tests and analyzed the results using the simplified viscoelastic continuum damage (S-VECD) model. The findings indicate that incorporating encapsulated rejuvenating agents into recycled asphalt mixtures altered their mechanical properties and response to accumulated damage. The addition of RAP increased mixture stiffness, whereas the capsules reduced it. The S-VECD model enabled the evaluation of damage progression and the structural integrity of the mixtures, revealing a slower degradation rate in the R-C-1 mixture. However, despite the expectation that the capsules would enhance self-healing, the results showed that the regeneration of RAP-containing mixtures with capsules was similar to that of the reference mixture. This finding suggests that the release of the encapsulated rejuvenator may have been limited under the testing conditions. In conclusion, while the capsules modified the mechanical properties of the recycled mixtures, their effect on regeneration under the conditions of this study was limited.

Keywords: Recycled asphalt mixtures, self-healing, rejuvenating agents, capsules, S-VECD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Características geométricas dos ensaios à fadiga comumente empregados....	22
Figura 2. Tensão de tração no corpo de prova submetidos a compressão vertical.	23
Figura 3. Configuração do ensaio em amostra trapezoidal.	24
Figura 4. Configuração do ensaio de flexão em viga quatro pontos.	25
Figura 5. Preparação (a), posicionamento (b e c) e possibilidades de ruptura da amostra no ensaio de fadiga a tração direta (d).	26
Figura 6. Ilustração da inadequação dos ensaios não homogêneos (com dano) para caracterizar a fadiga.....	27
Figura 7. Hipótese do processo de fechamento de trincas.....	36
Figura 8. Mecanismos envolvidos na regeneração via inter-difusão molecular.....	37
Figura 9. Microscopia de fluorescência da amostra de PBmas com diferentes tempos de regeneração (0, 1, 3 e 18 horas).....	42
Figura 10. Imagens de tomografia computadorizada (CT-Scan) de um dos corpos de prova estudados durante o processo de regeneração.	44
Figura 11. Fluxograma metodológico da pesquisa.	50
Figura 12. Curvas de distribuição granulométrica dos agregados virgens.	51
Figura 13. Viscosidade do ligante virgem.	54
Figura 14. Curvas de distribuição granulométrica dos RAP.....	56
Figura 15. Viscosidade do ligante extraído do RAP.	57
Figura 16. Óleo de algodão residual.	58
Figura 17. Processo esquemático de fabricação de cápsulas poliméricas por gelificação ionotrópica de alginato.	59
Figura 18. Procedimento de preparação da emulsão para formação das cápsulas.	60
Figura 19. Processo de gotejamento para formação das cápsulas.	60
Figura 20. Tentativas de confecção de cápsulas em diferentes razões óleo/água.....	61
Figura 21. Cápsulas nos três estados analisados para determinação das respectivas áreas.	63
Figura 22. Área das cápsulas.	64
Figura 23. Espectros de FTIR para as cápsulas com óleo de algodão.....	65
Figura 24. Gráficos de TGA e DTA das cápsulas do Tipo 1.....	68
Figura 25. Gráficos de TGA e DTA das cápsulas do Tipo 2.....	68
Figura 26. Comparação entre os perfis de perda de massa para os dois tipos de cápsulas.	69
Figura 27. Ensaio de determinação da resistência à compressão das cápsulas.	70
Figura 28. Resistência à compressão das cápsulas.	71
Figura 29. Média da resistência à compressão das cápsulas.	71
Figura 30. Fluxograma da dosagem Superpave.....	73
Figura 31. Curvas Fuller da dosagem Superpave.	73
Figura 32. Mapa de PG.....	76
Figura 33. Blend chart da mistura reciclada.	77
Figura 34. Curva Fuller da mistura reciclada.	77

Figura 35. Grau de ativação do ligante RAP.	78
Figura 36. Corpo de prova com cápsulas.	80
Figura 37. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	81
Figura 38. Forma de pulso de carregamento.	83
Figura 39. Ensaio de módulo de resiliência.	83
Figura 40. Procedimento de remoção das extremidades dos corpos de prova.	88
Figura 41. Fixação dos corpos de prova nas placas.	88
Figura 42. Ruptura dos CP's nas temperaturas de 25 e 27°C.	89
Figura 43. Resistência à tração das misturas asfálticas estudadas.	98
Figura 44. RRT das misturas asfálticas estudadas.	101
Figura 45. Módulo de resiliência das misturas asfálticas estudadas.	103
Figura 46. Flow Number das misturas asfálticas estudadas.	105
Figura 47. Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões.	108
Figura 48. Número de ciclos até a ruptura versus deformação resiliente inicial.	108
Figura 49. Curvas mestras das misturas das misturas asfálticas estudadas na temperatura de referência de 20°C, em escala log-log.	111
Figura 50. Curva C x S da mistura REF.	114
Figura 51. Curvas CxS da mistura RAP.	115
Figura 52. Curvas CxS da mistura R-C-1.	115
Figura 53. Curvas CxS da mistura R-C-2.	116
Figura 54. Curvas características de dano das misturas asfálticas estudadas.	116
Figura 55. Envoltória de ruptura G^R vs. N_f para as misturas asfálticas estudadas.	118
Figura 56. Simulação da vida de fadiga a partir do critério de ruptura G^R	120
Figura 54. Curvas características de dano com períodos de repouso das misturas estudadas.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características físico-químicas do óleo de algodão.	34
Tabela 2. Caracterização dos agregados.	51
Tabela 3. Ensaio para avaliação das propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico.	52
Tabela 4. Caracterização física e reológica do ligante asfáltico virgem.	53
Tabela 5. Nomas para caracterização física do material fresado	55
Tabela 6. Caracterização do ligante extraído do RAP.	56
Tabela 7. Viscosidade do óleo de algodão residual.	58
Tabela 8. Parâmetro das misturas inferior, intermediária e superior.	74
Tabela 9. Parâmetro volumétricos das misturas com variação no teor de ligante.	75
Tabela 10. Percentuais em massa da mistura asfáltica dosada.	75
Tabela 11. Percentuais em massa da mistura asfáltica reciclada.	78
Tabela 12. Parâmetros volumétricos da mistura asfáltica reciclada.	79
Tabela 13. Quantificação da liberação de óleo pelas cápsulas após compressão.	79
Tabela 14. Valores limites recomendados para o parâmetro Sapp à diferentes níveis de tráfego.	94
Tabela 15. Períodos de repouso reduzidos para as condições de cada mistura estudada.	96
Tabela 16. Resultado da análise estatística (ANOVA) para os valores de resistência à tração das misturas estudadas	99
Tabela 17. Resultados do teste t para o ensaio de RT.	102
Tabela 18. Resultados do teste t para o ensaio de MR.	104
Tabela 19. Resultados do teste de Tukey para os dados de FN das misturas estudadas	106
Tabela 20. Resumo das características das curvas de vida de fadiga das misturas.	109
Tabela 21. FFM a partir do ensaio de vida de fadiga por compressão diametral.	110
Tabela 22. Coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal utilizado para determinação do módulo dinâmico.	111
Tabela 23. Coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal utilizado para determinação do módulo de armazenamento.	112
Tabela 24. Tempos de relaxação (ρ_i) e módulos do elemento de Maxwell (E_i) para as séries de Prony.	113

Tabela 25. Taxa de evolução de dano α , os coeficientes C11 e C12 da curva característica de dano das misturas asfálticas estudadas.	117
Tabela 26. Coeficientes de regressão do critério GR, critério DR e parâmetro Sapp. ..	118
Tabela 27. Fator de Fadiga das Misturas.	120
Tabela 28. Índice de regeneração no espaço CxS.....	122

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AMPT	<i>Asphalt Mixture Performance Tester</i>
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (Análise de Variância)
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador giratório Superpave
CP	Corpo-de-prova
CT-Scan	<i>Computed Tomography Scan</i> (Tomografia Computadorizada)
DMR	Dinamic Modulus Ratio
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DTA	Análise térmica diferencial
FFM	Fator de Fadiga das Misturas
FN	Flow Number
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier)
Jnr	Compliances não-recuperáveis
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (Transformador Diferencial Linear Variável)
LVE	Elástico-viscoelástico
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MR	Módulo de resiliência
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
Nf	Número de aplicações de carga na ruptura
PG	<i>Performance Grade</i>
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement (Pavimento Asfáltico Reciclado)
R-C-1	Mistura reciclada com cápsulas do Tipo 1
R-C-2	Mistura reciclada com cápsulas do Tipo 2
REF	Mistura de referência (sem RAP e sem cápsulas)
RRT	Resistência à tração retida por umidade induzida
RT	Resistência à tração
RTFO	<i>Rolling Thin Film Oven</i>
S	Acúmulo de dano no modelo S-VECD

S_{app}	Stress Application Parameter
S-VECD	<i>Simplified Viscoelastic Continuum Damage</i> (Modelo Viscoelástico de Dano Contínuo Simplificado)
TGA	<i>Termogravimetric Analysis</i> (Análise Termogravimétrica)
TMN	Tamanho máximo nominal
T_i	Temperatura crítica da mistura
Tukey	Teste de Comparação Múltipla de Tukey
UTM-25	Universal Testing Machine
VECD	Viscoelastic Continuum Damage Model
H	Altura do corpo de prova
C₁₁, C₁₂	Coeficientes da curva característica de dano
k₁; k₂; k₃ e k₄	Coeficientes da curva de vida de fadiga
a₁, a₂ e a₃	Coeficientes de ajuste
δ, α, β e γ	Coeficientes de ajuste
C vs. S	Curva característica de dano
S_{C_i}	Dano na integridade de repouso
ε	Deformação do material
ε_i	Deformação resiliente específica
D	Diâmetro do corpo de prova
Δσ	Diferença de tensões no centro do corpo de prova
a_T	Fator de deslocamento
f_R	Frequência reduzida
%H_S	Índice de regeneração
C	Integridade do material no modelo S-VECD
G^{RAP}_{sb}	Massa Específica Aparente
G^{RAP}_{se}	Massa Específica Efetiva
G_{mm}	Massa Específica Máxima Medida
μs	Microdeformação
E *	Módulo complexo
E(ξ)	Módulo de relaxação do material
 E *	Módulo dinâmico absoluto
E_i	Módulo do elemento de Maxwell nas séries de Prony
W_C^R	Pseudo-energia de deformação liberada por ciclo

σ_t	Resistência à tração
α	Taxa de evolução de dano
TR	Taxa de reciclagem
TC_{alvo}	Temperatura crítica alvo
TC_{RAP}	Temperatura crítica do ligante do RAP
TC_{virgem}	Temperatura crítica do ligante virgem
T_R	Temperatura de referência
T	Temperatura do ensaio
t	Tempo físico
ξ	Tempo reduzido
ρi	Tempos de relaxação das séries de Prony
σ_{pico}	Valor máximo da tensão no ciclo avaliado
σ_{vale}	Valor mínimo da tensão no ciclo avaliado
ΔS_{H_i}	Varição de dano entre pontos de mesma integridade
τ	Variável de integração relacionada ao tempo reduzido

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
2.	OBJETIVO	19
2.1	OBJETIVO GERAL.....	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	PATOLOGIAS NOS REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS: TRINCAS POR FADIGA	20
3.1.1	Tipos de ensaios de fadiga em misturas asfálticas.....	21
3.2	MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS	28
3.3	AGENTES REJUVENESCEDORES	30
3.3.1	Óleos vegetais.....	32
3.4	REGENERAÇÃO (<i>SELF-HEALING</i>) EM MISTURAS ASFÁLTICAS	35
3.4.1	Regeneração (<i>self-healing</i>) em misturas asfálticas recicladas.....	39
3.4.2	Mensuração da regeneração.....	41
3.3.2	Modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-VECD)	45
3.5	INTENSIFICAÇÃO DA REGENERAÇÃO.....	46
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1	MATERIAIS.....	50
4.1.1	Agregados virgens	50
4.1.2	Ligante Asfáltico de Petróleo	51
4.1.3	Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).....	54
4.1.4	Óleo de Algodão	57
4.1.5	Cápsulas.....	58
4.2	MÉTODOS.....	62
4.2.1	Cápsulas.....	62
4.2.2	Dosagem Superpave	72
4.2.3	Produção das misturas recicladas	75
4.2.4	Incorporação das cápsulas na mistura asfáltica	79
4.2.5	Propriedades mecânicas das misturas asfálticas.....	81
4.2.6	Medida da regeneração	90
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	98

5.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	98
5.1.1	Resistência à tração	98
5.1.2	Dano por umidade induzida.....	100
5.1.3	Módulo de resiliência	103
5.1.4	Resistência à deformação permanente.....	105
5.1.5	Vida de fadiga.....	107
5.1.6	Módulo dinâmico.....	110
5.2	APLICAÇÃO DO MODELO SIMPLIFICADO DE DANO CONTÍNUO (S-VECD).....	113
5.2.1	Mensuração da regeneração.....	121
6.	CONCLUSÕES	125
7.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	127
	AGRADECIMENTOS	128
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

1. INTRODUÇÃO

A crescente adoção de asfalto reciclado (RAP – reclaimed asphalt pavement), material obtido a partir da fresagem de revestimentos asfálticos deteriorados, em misturas asfálticas novas, representa uma alternativa para a reutilização de materiais e a redução do impacto ambiental associado às atividades de recuperação de pavimentos. A utilização do RAP reduz a extração de agregados naturais e o consumo de ligante asfáltico, mitigando os impactos ambientais decorrentes dessas atividades (ALSARAYREH; CARRIÓN, 2024; ZHOU *et al.*, 2019). Além disso, em um contexto de elevação dos custos dos insumos para pavimentação, a incorporação de RAP surge como uma estratégia econômica viável.

No entanto, a presença de ligante envelhecido no RAP compromete as propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas, aumentando sua rigidez e reduzindo a capacidade de resistência à fadiga e fissuração (JAHANGIRI *et al.*, 2019). Estudos apontam que misturas com altos teores de RAP apresentam menor desempenho em fadiga, tornando-se mais suscetíveis a trincas e degradação prematura (HASHIM *et al.*, 2022; ZIARI *et al.*, 2019). Para remediar esse problema, a adição de agentes rejuvenescedores tem sido investigada como solução para restaurar as propriedades do ligante oxidado e melhorar o desempenho das misturas recicladas (SALIM; JONI; AL-RUBAEE, 2024).

Os agentes rejuvenescedores são substâncias que promovem a recuperação das propriedades químicas e reológicas do ligante envelhecido, reduzindo sua viscosidade e restabelecendo sua adesividade e flexibilidade (ASLI, 2012; REYES-ORTIZ *et al.*, 2012). Entre os diferentes tipos de rejuvenescedores, os óleos vegetais têm se destacado como alternativas sustentáveis e eficientes (ZAUMANIS *et al.*, 2013). Costa *et al.* (2023) indicaram que a adição de óleo de algodão residual possibilitou um aumento de inserção de RAP na mistura sem comprometer as propriedades mecânicas destas. A utilização do óleo em sua forma residual destaca-se pelo seu potencial na mitigação de impactos ambientais associados ao descarte inadequado.

Paralelamente, a capacidade de regeneração (*self-healing*) das misturas asfálticas tem sido explorada como um fenômeno capaz de prolongar a vida útil dos pavimentos (QIU *et al.*, 2012). Esse processo é caracterizado pela recuperação de danos microscópicos, como microtrincas, ao longo do tempo, reduzindo a degradação da

mistura e aumentando sua durabilidade (FISCHER, 2010). Entretanto, a literatura aponta uma lacuna no entendimento da interação entre o RAP e a regeneração, especialmente considerando a influência dos ligantes envelhecidos na capacidade de recuperação dessas misturas (Mullapudi *et al.*, 2020).

Para intensificar a capacidade de regeneração, recentes pesquisas têm investigado a incorporação de agentes rejuvenescedores encapsulados, que permitem a liberação gradual do aditivo ao longo do tempo, diretamente nas regiões fissuradas da mistura (AL-MANSOORI *et al.*, 2018a). O conceito se baseia na encapsulação do rejuvenescedor, permitindo sua distribuição homogênea na mistura asfáltica. Durante o carregamento do pavimento, com a formação de microtrincas, as cápsulas se rompem e liberam o rejuvenescedor diretamente sobre as regiões danificadas, acelerando a regeneração e prolongando a vida útil do pavimento (MICAELO *et al.*, 2016).

Diante desse cenário, este trabalho avaliou a capacidade regenerativa de misturas asfálticas recicladas com a adição de agentes rejuvenescedores encapsulados, por meio de ensaios de fadiga. Para isso, foram analisadas as propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas com a incorporação das cápsulas em comparação com misturas de referência. Além disso, o desempenho dessas misturas em relação à fadiga foi investigado utilizando o modelo viscoelástico de dano contínuo (S-VECD), permitindo a análise da capacidade de recuperação das misturas com a incorporação das cápsulas, com base nos parâmetros de integridade versus dano.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar, por meio do ensaio de vida de fadiga, a capacidade regenerativa de misturas asfálticas recicladas com a utilização de agentes rejuvenescedores encapsulados com óleo de algodão residual.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o comportamento mecânico nas misturas asfálticas recicladas com a incorporação das cápsulas em comparação com as misturas de referência;
- Verificar a influência das cápsulas de óleo de algodão residual por meio da aplicação do modelo viscoelástico de dano contínuo (S-VECD) nas misturas asfálticas recicladas;
- Analisar a capacidade de regeneração das misturas recicladas com a incorporação das cápsulas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda as trincas por fadiga e os ensaios utilizados para avaliá-las. Neste também é discutido as misturas asfálticas recicladas, a tecnologia de reparação (*self-healing*), incluindo métodos de mensuração e o modelo S-VECD, além de agentes rejuvenescedores como óleos vegetais e estratégias para intensificar a regeneração dos pavimentos.

3.1 PATOLOGIAS NOS REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS: TRINCAS POR FADIGA

Um dos desafios cruciais nos pavimentos asfálticos é a falha por fadiga na camada superficial. O processo de fadiga envolve a iniciação e a propagação de trincas sob carregamento cíclico. A fadiga, sendo um dos principais modos de falha das estruturas de pavimento, resulta na degradação dos materiais e, por conseguinte, na estrutura do pavimento (DI BENEDETTO *et al.*, 2004).

A fadiga é um dos principais tipos de deterioração do pavimento asfáltico, caracterizada pela redução do módulo de rigidez inicial ou pela falha mecânica do material após um número determinado de ciclos de carga. Esse processo pode ser dividido em dois estágios distintos: a iniciação de microtrincas, quando pequenas fissuras começam a se formar, e a propagação de micro e macrotrincas, que leva à falha do material e da amostra (ALHADDAD, 2015). Este processo é influenciado por fatores como o tipo de mistura asfáltica, a temperatura, a frequência e a magnitude das cargas aplicadas (BABADOPULOS; SOARES; CASTELO BRANCO, 2015). Em laboratório, a vida de fadiga é definida como o número de ciclos de tensão ou deformação que uma amostra pode suportar até sua falha, de acordo com critérios específicos do ensaio empregado.

Este fenômeno é notoriamente complexo e, obter relações confiáveis entre ensaios de laboratório e o que ocorre efetivamente em campo, em termos de trincamento, representa um desafio. Existem diversas possibilidades de ensaios laboratoriais para avaliar a fadiga de misturas, cada um com suas variações e limitações, sendo os principais deles: fadiga por compressão diametral, fadiga a flexão e fadiga a tração direta. Portanto, é recomendável que as várias abordagens analíticas sejam avaliadas cuidadosamente para selecionar o teste capaz de caracterizar com maior eficácia o defeito investigado (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

3.1.1 Tipos de ensaios de fadiga em misturas asfálticas

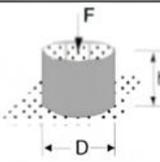
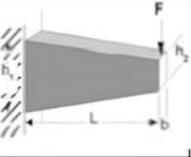
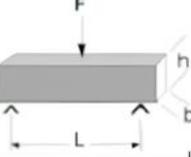
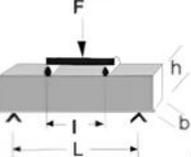
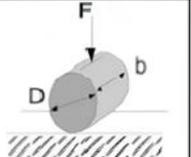
Dois aspectos principais se destacam como diferenciais entre os ensaios mecânicos em geral: a geometria da amostra, relacionada à aplicação e medição do carregamento, bem como à forma de medir a deformação; e o percurso de carregamento, que pode ser monotônico, cíclico ou apresentar vários formatos de função de carregamento, incluindo períodos de repouso, entre outros (DI BENEDETTO *et al.*, 2004). Dentre as diferentes geometrias de ensaio de fadiga (e.g. viga, cilindro esbelto ou espesso) e suas respectivas formas de carregamento (flexão, compressão diametral e tração direta), apenas o ensaio realizado por tração direta apresenta um estado de tensões e deformações teoricamente uniforme (OLIVEIRA *et al.*, 2023). Esses ensaios são conhecidos como homogêneos, enquanto os demais, com carregamentos que não garantem essa uniformidade, são chamados de não-homogêneos. Os ensaios homogêneos são mais eficazes para investigar a fadiga pois evitam as violações das hipóteses simplificadoras que podem ocorrer nas análises de ensaios não-homogêneos (BABADOPULOS; SOARES; CASTELO BRANCO, 2015).

Segundo Oliveira *et al.* (2023) os ensaios homogêneos e não-homogêneos apresentam abordagens distintas para o cálculo das tensões e deformações em materiais. Nos ensaios homogêneos, as tensões e deformações são calculadas diretamente a partir das medidas obtidas no contorno do corpo-de-prova (CP) usando dispositivos de medição, como células de carga e LVDTs, considerando a geometria adotada. A hipótese fundamental desses ensaios é que o comportamento reológico do material (elástico, viscoelástico etc.) não afeta o cálculo das tensões, desde que o ensaio seja homogêneo. Isso significa que as heterogeneidades do material não influenciam significativamente o resultado, desde que o distanciamento entre a menor e a maior dimensão do CP seja adequado.

Por outro lado, nos ensaios não-homogêneos, o cálculo das tensões e deformações exige a solução de um problema de valor de contorno, onde é necessário utilizar uma equação constitutiva que descreva o comportamento do material (como elástico, viscoelástico ou viscoelastoplástico). Nesse caso, é preciso estabelecer uma hipótese sobre o comportamento reológico do material antes de calcular as tensões e deformações, o que pode levar a um erro se o material não seguir a hipótese definida. Portanto, ao contrário dos ensaios homogêneos, as análises de tensões e deformações nos ensaios não-homogêneos exigem a escolha de um modelo constitutivo adequado, e o cálculo só será

válido se o comportamento real do material coincidir com a hipótese inicial. Idealmente, esses ensaios também devem considerar análises sobre cargas, deslocamentos e rigidez para evitar erros na interpretação dos resultados.

Figura 1. Características geométricas dos ensaios à fadiga comumente empregados

Tipo Teste	Geometria	Tipo Carregamento
T/C		Tração direta Homogêneo
2PB		Flexão - dois pontos Não Homogêneo
3PB		Flexão - três pontos Não Homogêneo
4PB		Flexão - quatro pontos Não Homogêneo
IDT		Tração indireta Não Homogêneo

Fonte: Adaptado de Di Benedetto *et al.* (2004) apud Colpo (2014).

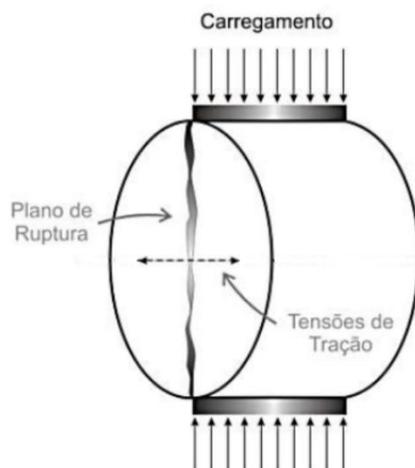
Conforme ilustrado na Figura 1, os ensaios utilizados para análise da fadiga em misturas asfálticas podem apresentar variações, tanto em sua geometria, quanto nas condições da aplicação do carregamento.

- Fadiga por compressão diametral

O ensaio de fadiga por compressão diametral é amplamente utilizado no Brasil, especialmente por sua simplicidade na obtenção das amostras, com medidas aproximadas de 100x64 mm. Nesse ensaio, os corpos de prova cilíndricos são submetidos a uma compressão vertical, o que gera uma tensão de tração na direção horizontal da amostra (Figura 2). O carregamento é realizado com uma frequência de 60 aplicações por minuto, consistindo em pulsos de carga de 0,1s seguidos de 0,9s de repouso. Embora seja eficaz

para estimar a vida de fadiga do material, o teste é frequentemente criticado pelo tempo de operação elevado e pela complexidade na interpretação dos resultados. Benedetti *et al.* (2018) destacam que, devido à presença de deformações permanentes durante o regime de tensão controlada, é desafiador dissociar os danos causados pela fadiga das deformações permanentes, o que torna a análise mais difícil e, por vezes, não totalmente representativa da fadiga do material (BOEIRA *et al.*, 2018).

Figura 2. Tensão de tração no corpo de prova submetidos a compressão vertical.



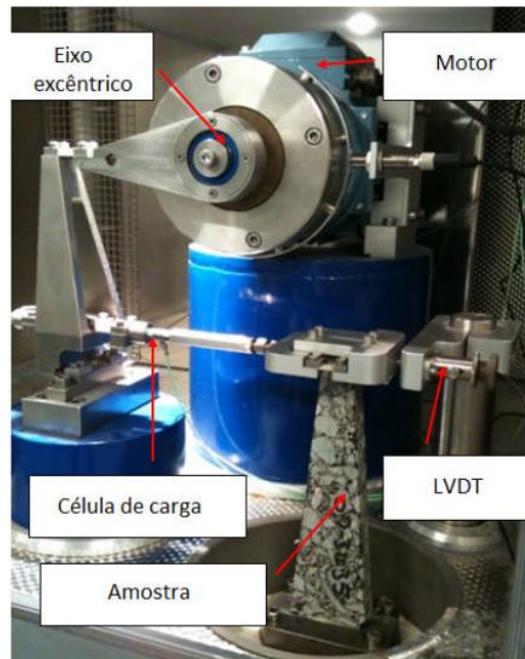
Fonte: Adaptado de Brito (2006).

- Fadiga por flexão

Os ensaios de fadiga por flexão são utilizados para avaliar a resistência de materiais sob carregamentos cíclicos, sendo amplamente aplicados no estudo de misturas asfálticas. Esses ensaios podem ser realizados em dois formatos principais: em corpos de prova trapezoidais e em vigas de quatro pontos.

No ensaio de fadiga à flexão em corpos de prova trapezoidais (Figura 3), desenvolvido na França e normatizado pela EN 12697:24, utilizam-se amostras trapezoidais com dimensões padronizadas. O ensaio é realizado a uma frequência de 25 Hz e temperatura controlada de 10°C, aplicando-se deformação ou tensão controlada. A extremidade maior do corpo de prova é fixa, enquanto a extremidade menor é submetida a um deslocamento para induzir deformação constante. O critério de término é definido pela redução de 50% da tensão inicial após 100 ciclos. A curva de fadiga é gerada a partir de testes em diferentes níveis de deformação, utilizando múltiplos corpos de prova (LOUREIRO, 2003).

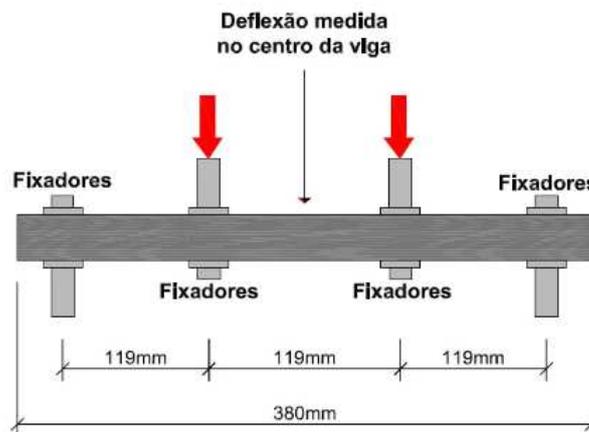
Figura 3. Configuração do ensaio em amostra trapezoidal.



Fonte: Grenfell (2013) apud Mocelin (2018).

O ensaio de fadiga à flexão em viga de quatro pontos, normatizado por padrões como AASHTO T-321 e ASTM D7460, utiliza corpos de prova prismáticos bi-apoiados. Este ensaio aplica cargas verticais nos dois terços médios da viga, gerando uma zona de tração uniforme no centro, onde o momento fletor é constante e os esforços cortantes são nulos (Figura 4). A frequência típica é de 10 Hz, e a temperatura é controlada em câmara climatizada. O critério de término pode ser a ruptura total da amostra (tensão controlada) ou a redução de 50% da rigidez inicial (deformação controlada). Este método apresenta vantagens, como maior correlação com o comportamento em campo e menor variabilidade dos resultados, porém exige a consideração de fatores de correlação entre laboratório e campo.

Figura 4. Configuração do ensaio de flexão em viga quatro pontos.



Fonte: Adaptado de Colpo (2014).

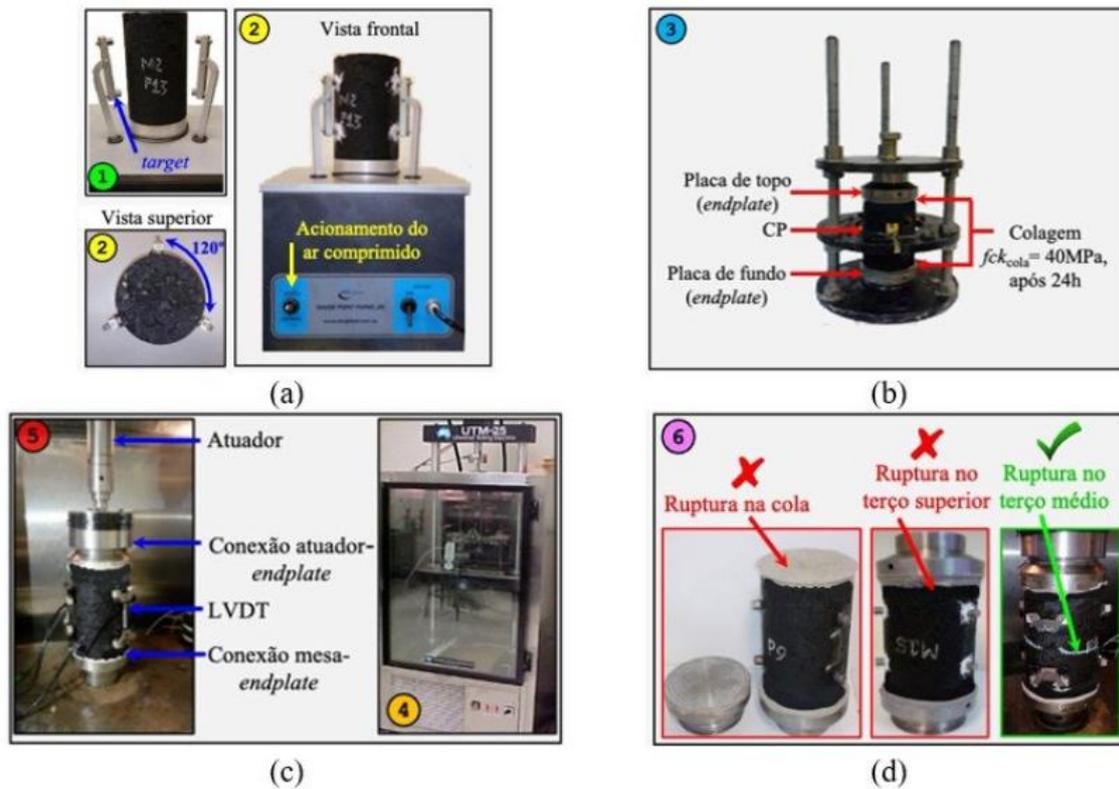
- Ensaio de tração direta

A norma AASHTO TP 107-14 estabelece o método padrão de ensaio para determinar a curva característica de dano de misturas asfálticas a partir de testes de fadiga cíclica sob tensão direta. Esse ensaio tem como objetivo caracterizar a relação entre a integridade estrutural da mistura e o nível de dano acumulado, sendo uma ferramenta essencial para a análise da fadiga em pavimentos asfálticos.

O ensaio quantifica a degradação estrutural causada pela repetição de cargas cíclicas, permitindo a determinação da curva característica de dano (C vs. S), que expressa a relação entre pseudo-rigidez (C), que representa a integridade estrutural do material; e dano (S), que quantifica as microestruturas danificadas na mistura asfáltica ao longo dos ciclos de carregamento. Essa curva é independente da temperatura, da frequência de carregamento e do modo de aplicação da carga, o que permite sua aplicação em diferentes condições operacionais.

O ensaio é realizado em um sistema de ensaio de tensão direta, no qual uma carga cíclica é aplicada ao corpo de prova até a falha, com medição contínua da resposta da amostra quanto ao ângulo de fase e módulo complexo. A ruptura da amostra acontece quando ocorre uma redução no valor de ângulo de fase (BABADOPULOS, 2014).

Figura 5. Preparação (a), posicionamento (b e c) e possibilidades de ruptura da amostra no ensaio de fadiga a tração direta (d).



Fonte: Oliveira *et al.* (2023).

A Figura 5 ilustra as etapas de preparação, montagem e modos de ruptura no ensaio de fadiga por tração-compressão direta em misturas asfálticas. Após a preparação das amostras, procede-se com a colagem dos targets e dos endplates, conforme mostrado nos passos 1, 2 e 3. A fixação dos targets é realizada com o auxílio de um gabarito específico, que faz parte da própria prensa utilizada no ensaio, garantindo um posicionamento preciso dos sensores de deslocamento (LVDTs). Para essa etapa, utiliza-se um adesivo epóxi de baixa fluidez, assegurando a aderência adequada dos componentes.

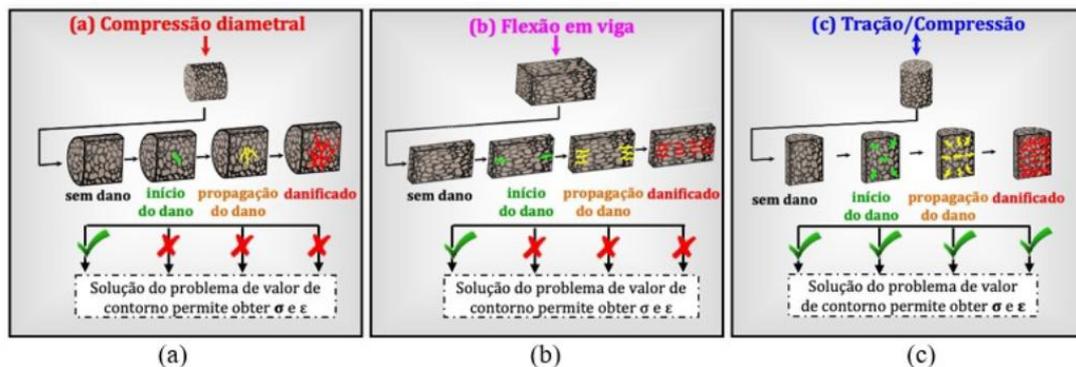
Após a fixação dos targets e *endplates*, as amostras são montadas na prensa e ensaiadas, conforme ilustrado nos passos 4 e 5 (Figura 5c). O sistema de fixação conecta a amostra ao atuador e à base da prensa, permitindo a aplicação das cargas cíclicas controladas. Sensores LVDT são acoplados para registrar as deformações ao longo do ensaio, possibilitando a análise do comportamento da mistura asfáltica sob fadiga. Por fim, a Figura 5d apresenta os possíveis modos de ruptura das amostras após o ensaio. A ruptura na cola indica falha na adesão entre a amostra e os *endplates*, comprometendo a

confiabilidade dos resultados. A ruptura no terço superior também não é desejável, pois pode estar associada a concentrações de tensão inadequadas. O modo de falha mais representativo ocorre no terço médio, pois reflete de forma mais fiel o comportamento da mistura asfáltica sob fadiga.

Oliveira *et al.* (2023) investigaram os fundamentos da mecânica do dano e da viscoelasticidade na avaliação da fadiga de misturas asfálticas, destacando o ensaio de tração-compressão como uma alternativa mais precisa aos métodos tradicionais, como o ensaio de compressão diametral. Esse ensaio, por ser homogêneo, permite avaliar a evolução do dano sem as limitações dos métodos não homogêneos, que dificultam a diferenciação entre dano por fadiga e fluência.

A Figura 6 compara diferentes ensaios de fadiga: compressão diametral (a), flexão em viga (b) e tração-compressão (c). Nos dois primeiros, a distribuição não homogênea de tensões restringe a validade das equações constitutivas apenas para estados não danificados. Já no ensaio de tração-compressão, a aplicação homogênea das cargas mantém as equações válidas independentemente do nível de dano, permitindo um monitoramento mais preciso da degradação. Assim, esse método é o mais adequado para obter propriedades fundamentais da fadiga das misturas asfálticas e analisar o comportamento mecânico de pavimentos (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Figura 6. Ilustração da inadequação dos ensaios não homogêneos (com dano) para caracterizar a fadiga



Fonte: Oliveira *et al.* (2023).

A deterioração resultante da fadiga é de suma importância na construção de pavimentos e requer uma compreensão aprofundada para garantir um projeto estrutural adequado (BABADOPULOS; SOARES; CASTELO BRANCO, 2015).

3.2 MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

O pavimento, ao longo do tempo, perde sua funcionalidade devido à exposição constante a fatores como luz solar, tráfego e condições ambientais, levando à deterioração dos materiais e resultando em alterações em suas propriedades, como o aumento de rigidez e da viscosidade e redução da flexibilidade. Essas modificações, conforme apontado por Liu *et al.* (2022), induzem a uma série de problemas, incluindo desagregação, ruturas, danos causados por umidade e fissuras.

Ao longo do período de serventia de pavimento com revestimento asfáltico é comum a ocorrência de irregularidades longitudinais significativas e o início de sua deterioração estrutural. Nesses casos, torna-se necessário restaurar sua planicidade e capacidade de carga. Isso pode ser alcançado pela aplicação de espessuras adicionais de camadas ou pela remoção de parte ou totalidade da espessura do revestimento deteriorado por meio de equipamentos especializados, como fresadoras, seguido pela execução de uma nova camada de revestimento asfáltico (Bernucci *et al.*, 2022). O material resultante do corte deve ser reciclado na própria obra geradora ou em outras obras que adotem tecnologias de reciclagem.

Para assegurar a segurança e o desempenho adequado, a manutenção de pavimentos asfálticos torna-se uma necessidade, devendo ser economicamente viável e ecologicamente sustentável.

Além disso, a manipulação dos volumes consideráveis de RAP representa um desafio significativo na indústria de pavimentos, tendo em vista que, muitas vezes, misturas de RAP são descartadas em aterros sanitários, resultando em riscos à saúde pública e problemas ambientais, principalmente devido à contaminação do solo devido aos componentes da mistura (KUMAR, 2023). Desta forma, a reutilização do RAP também se mostra como mais uma medida ambientalmente sustentável.

No entanto, o ligante asfáltico envelhecido presente no RAP pode representar um desafio, portanto é essencial considerar os potenciais efeitos negativos do uso de altas porcentagens de asfalto reciclado em misturas asfálticas novas, incluindo o envelhecimento do ligante, que pode alterar a composição química e impactar negativamente o desempenho mecânico da mistura final (JAHANGIRI *et al.*, 2019). Algumas agências restringem o uso de altos teores de RAP devido à redução na resistência à fadiga, à maior suscetibilidade a fissuras e à fragilidade das misturas que o contêm

(TRAN; TAYLOR; WILLIS, 2012). Diversos pesquisadores têm destacado os efeitos adversos da reciclagem de asfalto, com estudos demonstrando que o desempenho em fadiga e a resistência à fissuração das misturas asfálticas diminuem com a incorporação de materiais RAP (HASHIM *et al.*, 2022; ZHOU *et al.*, 2017; ZIARI *et al.*, 2019).

Os pontos que dificultam a utilização do RAP em novas misturas estão ligados, principalmente, ao ligante envelhecido nele presente. O envelhecimento leva a mudanças físicas no ligante asfáltico decorrentes de alterações químicas ao longo do tempo, como o aumento do conteúdo de asfaltenos e a redução de maltenos. Isso resulta em maior viscosidade, menor ductilidade e menor resistência à fissuração, devido à formação de aglomerados de asfaltenos e à redução de sua mobilidade sob estresse aplicado. O envelhecimento do ligante asfáltico ocorre em duas etapas: no curto prazo, devido à volatilização e absorção de componentes oleosos durante a usinagem e aplicação, e no longo prazo, causado por reações com oxigênio, polimerização e formação de estrutura interna (tixotropia) no campo (TRAN; TAYLOR; WILLIS, 2012).

Diante desses desafios, as técnicas de reciclagem de pavimentos buscam viabilizar o reaproveitamento do RAP por meio de processos classificados em à frio ou a quente, realizados em usina ou in situ (BATISTA, 2016). Na reciclagem à quente, o material fresado é incorporado diretamente à mistura asfáltica com materiais virgens. Já no processo de reciclagem a frio, o RAP é integrado sem aquecimento, formando uma camada de base que é posteriormente revestida por uma nova camada de mistura asfáltica produzida a quente.

Um dos desafios ao utilizar o RAP é a necessidade de restaurar as propriedades do ligante envelhecido presente no material. Para isso, utilizam-se agentes rejuvenescedores, que são aditivos químicos específicos capazes de reduzir a viscosidade do ligante oxidado e repor componentes perdidos, como compostos aromáticos e resinas, devolvendo ao ligante suas características originais de flexibilidade e adesividade (ASLI, 2012). Sem esses agentes, apenas a adição de ligante virgem não seria suficiente para corrigir as propriedades do material oxidado (REYES-ORTIZ *et al.*, 2012)

Além dos agentes rejuvenescedores, outros aditivos podem ser utilizados, como os surfactantes, que atuam na redução da tensão superficial entre os componentes da mistura. Diferentemente dos rejuvenescedores, que focam na restauração do ligante envelhecido, os aditivos surfactantes melhoram a trabalhabilidade das misturas,

permitindo a produção de misturas mornas a temperaturas mais baixas. Isso resulta em benefícios como menor consumo de energia, redução das emissões de gases de efeito estufa e diminuição do envelhecimento adicional do ligante durante a produção (SENGOZ *et al.*, 2006).

A reciclagem de pavimentos com o uso do RAP se apresenta como uma alternativa viável tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, ao promover a reutilização de materiais valiosos e reduzir a exploração de recursos naturais não renováveis. Contudo, o sucesso dessa abordagem depende diretamente da superação dos desafios associados ao ligante envelhecido, que pode comprometer o desempenho mecânico e a durabilidade das misturas asfálticas. O uso combinado de agentes rejuvenescedores e aditivos específicos, aliado a técnicas adequadas de reciclagem, pode restaurar as propriedades do ligante e melhorar a trabalhabilidade e a sustentabilidade das misturas. Dessa forma, torna-se possível alcançar um equilíbrio entre desempenho técnico e responsabilidade ambiental, contribuindo para um sistema de pavimentação mais sustentável e eficiente.

3.3 AGENTES REJUVENESCEDORES

Agentes rejuvenescedores são substâncias utilizadas para restaurar as propriedades reológicas e mecânicas do ligante asfáltico envelhecido. Eles atuam reduzindo a viscosidade do ligante oxidado e repondo componentes voláteis perdidos ao longo do tempo, como maltenos e compostos aromáticos, promovendo a recuperação da flexibilidade, adesividade e coesão do material. Esses agentes podem ser de origem natural, como óleos vegetais e bio-óleos, ou sintética, incluindo derivados de petróleo e polímeros modificadores. Sua aplicação é amplamente estudada para melhorar o desempenho e a durabilidade de misturas asfálticas recicladas.

Tao e Mallick (2009) citam os agentes rejuvenescedores como sendo a técnica mais empregada para facilitar o uso de RAP em novas misturas asfálticas, atuando para modificar as propriedades do ligante envelhecido contido no material fresado, teria influência sobre o desempenho final das misturas.

Quando da utilização de aditivos, no que diz respeito à resistência e rigidez destes pavimentos, pesquisas como as de Costa *et al.* (2023) e Melo Neto *et al.* (2023) têm apresentado resultados satisfatórios. Em particular, Costa *et al.* (2023) demonstraram que a adição de óleo de algodão e zeólita possibilitou o aumento do teor de RAP nas misturas

asfálticas recicladas sem comprometer seu desempenho mecânico. As misturas analisadas apresentaram boa resistência à tração, módulo resiliente e vida de fadiga, além de um desempenho adequado frente aos danos causados pela umidade e à abrasão. Da mesma forma, Melo Neto *et al.* (2023) investigaram a adição de ácidos graxos de borra de óleo de soja como agentes rejuvenescedores, constatando que a modificação do ligante reduziu sua viscosidade e rigidez, melhorando a resistência à umidade e aumentando a durabilidade das misturas recicladas com 40% de RAP. Além disso, os autores relataram uma redução nos custos de produção das misturas recicladas em comparação com a mistura de controle.

Os aditivos orgânicos envolvem a adição de materiais que se dissolvem em temperaturas abaixo da temperatura de mistura, resultando em melhoria na mistura asfáltica e endurecimento após compactação, fornecendo estabilidade ao material, aumentando sua resistência a deformações permanentes e sua resistência a fraturas. Os aditivos químicos em geral, são surfactantes, que agem afetando a superfície de ligação entre o ligante e o agregado, e comumente melhoram a resistência a fratura e aumentam a resistência à deformação permanente (HILL, 2011).

As zeólitas, minerais que podem ser encontrados em forma natural ou sintética, estão inseridas no grupo de aditivos formadores de espuma, injetam água para espumar o ligante e reduzir sua viscosidade, antes ou depois do período de mistura, tendendo a aumentar o potencial frente às deformações permanentes (SÁNCHEZ-ALONZO *et al.*, 2020) e melhorar sua sensibilidade à umidade (HURLEY; PROWELL, 2005).

Os rejuvenescedores são utilizados com a intenção de restaurar as características originais do ligante envelhecido, e podem ser obtidos a partir de diversos materiais, tais como óleos vegetais, ligantes moles, óleos de motor usados, óleos reciclados (ZAUMANIS *et al.*, 2013). Em seu estudo, Zaumanis *et al.* (2013) compararam a adição de seis diferentes agentes rejuvenescedores (óleo vegetal residual, graxa vegetal residual, óleo orgânico, *Tall Oil*, Extrato Aromático e Óleo de motor residual) e avaliaram a resistência à fadiga das misturas asfálticas confeccionadas com o uso desses agentes, onde obtiveram melhores resultados com o uso de óleos vegetais, da ordem de pelo menos 10^2 ciclos na escala logarítmica. Hugener *et al.* (2014) investigaram o uso de rejuvenescedores à base de óleo vegetal em misturas asfálticas recicladas, concluindo que esses compostos podem restaurar as propriedades do ligante envelhecido. O óleo vegetal, utilizado na reciclagem a frio, demonstrou capacidade de reativar o ligante e reduzir sua

viscosidade. Os testes indicaram que o óleo de canola e o de linhaça tiveram desempenho similar aos rejuvenescedores comerciais, contribuindo para a recuperação mecânica da mistura. O estudo também apontou que o óleo de cozinha usado pode ser uma alternativa viável e econômica para pavimentos reciclados.

3.3.1 Óleos vegetais

Os óleos vegetais são exemplos de agentes de reciclagem utilizados nas misturas com RAP, e seu uso justifica-se pela necessidade de restaurar as características que os componentes oleosos trazem ao ligante, que são perdidas durante o processo de envelhecimento (PETERSEN, 2000). Yu *et al.* (2014) explica que a adição destes agentes age modificando a estrutura química do ligante envelhecido e, conseqüentemente, o desempenho mecânico das misturas. Deste modo, a literatura referencia o uso de diferentes tipos de óleo para utilização com este fim, como nos estudos de Melo Neto *et al.* (2022), que utilizou os óleos de algodão e copaíba; Barros *et al.* (2017), que adicionou óleos de soja e milho; Torres *et al.* (2022), que estudou o uso de óleo vegetal residual.

Barros *et al.* (2017) utilizou da adição de óleo de soja e do milho, novos e residuais, para avaliar as propriedades das misturas asfálticas a partir desta modificação. Os resultados indicaram que a incorporação desses óleos levou a uma redução de até 25% na resistência à tração nas misturas com maior teor de aditivo, em comparação à mistura de controle. Além disso, verificaram um aumento no potencial de deformação permanente, com redução no número de ciclos até a fluência entre 43% e 58%, indicando menor resistência ao acúmulo de deformações plásticas. Apesar das reduções, os resultados ainda atendem aos requisitos de desempenho normatizados. A partir da comparação dos resultados obtidos para os óleos novos e residuais, e verificando semelhança nos valores encontrados, a autora reafirma a possibilidade de um descarte ecológico destes materiais.

Torres *et al.* (2022) estudou o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas com 0%, 30% e 60% de material fresado, e ligante modificado com óleo vegetal residual nos teores de 0%, 2% e 4%. Após avaliação do comportamento mecânico das misturas estudadas, os autores encontraram que o teor de adição de óleo é a variável de maior influência no comportamento mecânico das misturas, e que a adição de 60% de material fresado possibilita uma redução de até 1,2% de ligante virgem nas misturas.

Nayak e Sahoo (2015) utilizaram óleos locais da Índia para avaliar o efeito rejuvenescedor em misturas asfálticas e sua influência no comportamento mecânico das misturas. Em seus resultados, os autores atestam a capacidade da adição destes óleos em melhorar parâmetros de resistência a trincamentos e vida de fadiga das misturas. O estudo mostrou que a adição de óleos rejuvenescedores resultou em um aumento significativo na resistência à fadiga, sendo esse efeito quantificado por meio de ensaios no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) utilizando o parâmetro vida de fadiga, definido como o número de ciclos até que o módulo de cisalhamento complexo se reduza à metade do valor inicial. Os resultados indicaram que, para um ligante envelhecido VG-20, a vida de fadiga foi de apenas 7 ciclos, enquanto a adição de 5%, 10% e 15% de óleo de *Pongamia* aumentou esse valor para 8.412, 14.620 e mais de 15.000 ciclos, respectivamente. Da mesma forma, a adição do óleo composto de mamona resultou em 1.775, 7.503 e 11.120 ciclos para os mesmos teores de adição, demonstrando melhorias expressivas na recuperação das propriedades mecânicas do ligante envelhecido

Portanto, tem-se disponível uma vasta quantidade de dados na literatura no que diz respeito a utilização desses óleos vegetais como agentes rejuvenescedores principalmente para os casos de modificação de ligante.

3.3.1.1 Óleo de Algodão

O algodoeiro, pertencente ao gênero *Gossypium*, é uma planta cultivada amplamente desde os primórdios da humanidade (MENESES, 2007). Estima-se que a produção mundial de algodão ocupe cerca de 2 a 3% das terras aráveis, devido à diversidade de produtos que podem ser derivados de suas diferentes partes (Butzke, 2021). Além da fibra, que representa aproximadamente 85 a 90% do valor do algodoeiro, amplamente utilizada na indústria têxtil, a semente de algodão também tem grande utilidade, principalmente na produção de óleo e torta (SILVA *et al.*, 2014). A torta de algodão, composta por proteínas e fibras, é amplamente empregada como ração animal, especialmente para a alimentação de bovinos, enquanto o óleo de algodão, que corresponde a cerca de 16% da composição da semente (Butzke, 2021), é um dos óleos vegetais mais consumidos globalmente (CHENG *et al.*, 2020). As características físico-químicas comuns do óleo de algodão estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físico-químicas do óleo de algodão.

Densidade	a 15°C	0,915 a 0,932
	a 25°C	0,907 a 0,924
Índice de refração	a 25°C	1,469 a 1,474
	a 40°C	1,464 a 1,468
Ponto de fusão		42°C a 52°C
Índice de acidez (sol.N/1%)		0,5ml a 2,0ml
Índice de iodo (Hubit)		103 a 113
Índice de saponificação		190 a 198
Índice sulfocianogênide		61 a 65
Insaponificáveis		0,70 a 1,60

Fonte: Pinto (1963) *apud* EMBRAPA (2004).

O óleo de algodão tem sido objeto de diversos estudos, como no de Carvalho, Andrade e Silva (2008), sendo destacado como uma alternativa promissora para a produção de biodiesel, devido à abundância da matéria-prima e sua qualidade. Além disso, este óleo vem sendo utilizado como modificador de ligantes asfálticos. Dantas (2018) avaliou as propriedades físicas e reológicas de ligantes modificados com óleo de algodão, observando uma redução de até 25% no ponto de amolecimento e redução da viscosidade de aproximadamente 33% à medida que o teor de óleo aumentava. Esses resultados indicam que a adição de óleo de algodão pode reduzir a temperatura ideal de preparo das misturas asfálticas em cerca de 10°C. Farias (2019) obteve resultados semelhantes, observando que o óleo de algodão também contribui para a diminuição da viscosidade de ligantes asfálticos modificados.

Um estudo mais recente de Melo Neto *et al.* (2022) avaliou o efeito da incorporação de óleos de algodão e copaíba em ligantes asfálticos virgens. Os resultados dos ensaios de caracterização física e reológica mostraram que a adição desses óleos reduziu a viscosidade do ligante em até 34% e permitiu a redução das temperaturas de usinagem e compactação em até 9,6°C. No entanto, a modificação com óleo de algodão não apresentou melhorias significativas no desempenho do ligante quanto à sua susceptibilidade ao envelhecimento, já que os valores de penetração ficaram abaixo dos limites estabelecidos pela norma. Os autores concluíram que a adição de óleos como modificadores de ligantes pode levar a uma perda de resistência à deformação permanente, mas proporciona a vantagem de permitir temperaturas de mistura mais baixas, o que resulta em menor consumo de energia no processo.

Além do uso direto do óleo de algodão, outro fator importante é o rejeito do óleo de algodão proveniente da produção de ração para animais, um subproduto

frequentemente gerado em grandes quantidades. Esse rejeito pode ser considerado um desafio ambiental, pois, se não for adequadamente tratado ou reutilizado, pode contribuir para a poluição. No entanto, com a crescente demanda por alternativas sustentáveis e o aumento da conscientização ambiental, há um grande potencial para a reutilização desse óleo residual em diversas aplicações industriais, como na produção de biodiesel ou em modificações de materiais, como as misturas asfálticas. A utilização do óleo de algodão e de seus subprodutos, portanto, não só contribui para a sustentabilidade da cadeia produtiva do algodão, mas também auxilia na mitigação dos impactos ambientais associados à sua produção.

3.4 REGENERAÇÃO (*SELF-HEALING*) EM MISTURAS ASFÁLTICAS

A capacidade de regeneração é amplamente descrita na literatura como a habilidade intrínseca dos materiais de recuperar danos em sua estrutura. Qiu *et al.* (2012) definem essa propriedade ao destacar que, com o tempo, as características dos materiais se deterioram devido à formação de danos microscópicos, como microtrincas, que se expandem progressivamente e podem levar à falha do material. No entanto, materiais com *self-healing* possuem a capacidade de regenerar, ao menos parcialmente, esses danos ao longo de sua vida útil, contribuindo para uma maior durabilidade e desempenho estrutural.

A reparação é um procedimento desencadeado após danos ocorridos em um sistema funcional, objetivando reduzir os danos a nível local ou global e estender a funcionalidade e a vida útil do sistema danificado (FISCHER, 2010).

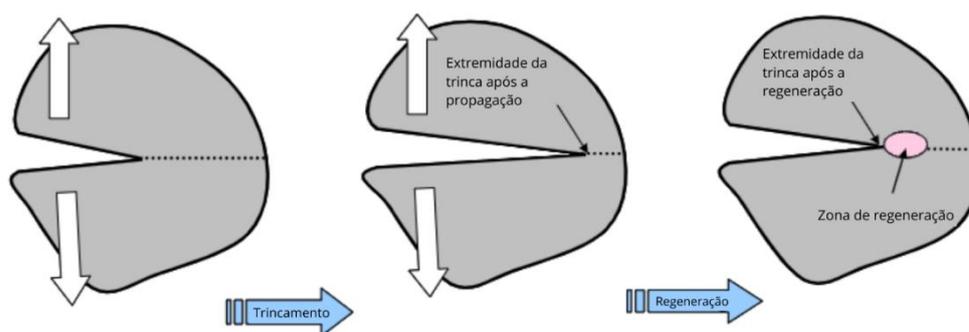
Danos referem-se a modificações em um elemento que impactam seu funcionamento ou desempenho. A avaliação de danos exige a comparação entre dois estados do elemento, sendo um considerado o estado inicial não afetado. O termo "dano" não implica necessariamente na perda total da funcionalidade, mas sim em uma alteração em relação ao estado ideal. Identificar danos é desafiador, uma vez que geralmente são fenômenos locais e podem ser difíceis de detectar oportunamente. Para compreender a regeneração em sistemas e dispositivos, é crucial entender a natureza e as consequências dos danos e processos de degradação. À medida que os danos aumentam, chegam a um ponto que afetam o funcionamento do sistema, conhecido como falha (FISCHER, 2010).

Durante o processo de fissuração, as trincas se propagam devido à repetição de carga e outros fatores. No entanto, como descrito por Qiu, Van de Ven e Molenaar (2013),

ao remover a carga e permitir um período de repouso, ocorre um fenômeno de regeneração. Em termos teóricos, esse processo pode ser interpretado como uma reversão da propagação da fissura. Dependendo do tempo e da temperatura aplicada durante a regeneração, o *self-healing* atua como um mecanismo de recuperação, reduzindo o tamanho das trincas dentro da zona de regeneração.

Os autores também apresentam, na Figura 7, uma representação esquemática desse processo, ilustrando a propagação da trinca e sua subsequente regeneração. A regeneração ocorre dentro de uma região específica, denominada zona de regeneração, onde o material recupera parcialmente sua integridade estrutural. Esse fenômeno demonstra a eficácia da regeneração na restauração de materiais danificados, reforçando sua importância para aumentar a durabilidade e a vida útil das estruturas.

Figura 7. Hipótese do processo de fechamento de trincas



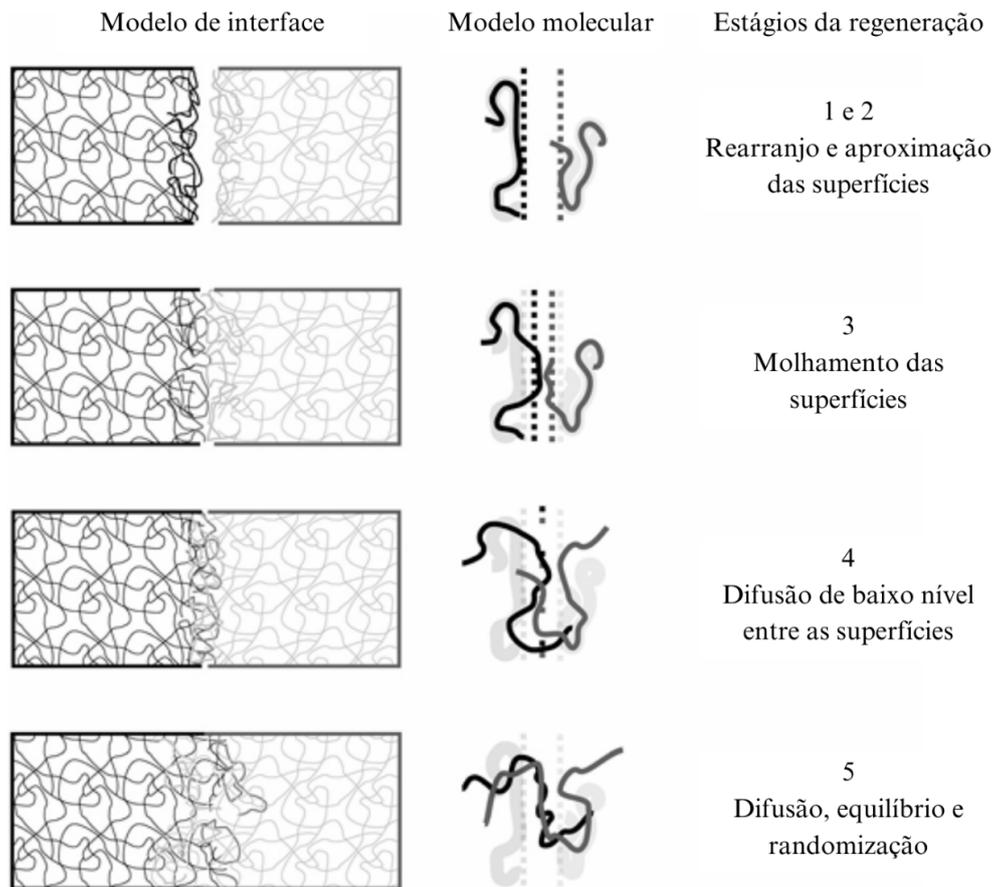
Fonte: Qiu, Van De Ven e Molenaar (2013).

O processo de regeneração em materiais asfálticos pode ser dividido em três etapas, de forma análoga à fadiga dos materiais, que envolve a formação, propagação de trincas e a falha estrutural. A primeira etapa consiste na aproximação das interfaces da trinca, influenciada pela redistribuição das tensões e pelo fluxo do ligante asfáltico. Em seguida, ocorre o fechamento da fissura, favorecido pelo molhamento (*wetting*), no qual as superfícies da trinca se aderem devido à energia de superfície livre. Por fim, a recuperação parcial das propriedades mecânicas acontece por meio da difusão molecular e reorganização da estrutura dos asfaltenos (Barros, 2020).

Esse modelo de regeneração por meio destas etapas foi inicialmente descrito por Wool e O'Connor (1981) e expandido por Kim e Wool (1983), sendo posteriormente aplicado por Wu, Meure e Solomon (2008) para ilustrar a regeneração em materiais poliméricos (Figura 8). Embora esse conceito tenha sido desenvolvido para polímeros, a teoria se aplica de forma consistente a materiais viscoelásticos, como os ligantes

asfálticos, reforçando a capacidade desses materiais de recuperar danos estruturais ao longo do tempo.

Figura 8. Mecanismos envolvidos na regeneração via inter-difusão molecular



Fonte: Adaptado de Wu, Meure e Solomon (2008).

O desenvolvimento de misturas asfálticas autorreparadoras e sua aplicação na pavimentação é uma inovação com potencial para dobrar a vida útil da estrada para entre 40 e 80 anos, reduzindo a necessidade de manutenção. Comparado aos métodos de manutenção convencionais, este tem o potencial de melhorar o fluxo de tráfego, reduzir a demanda por agregados frescos, diminuir as emissões de CO₂ e aumentar a segurança viária. A durabilidade desses materiais não é derivada da abordagem clássica de minimização de danos, mas sim da nova abordagem de projetar materiais com capacidades de regeneração. O pavimento asfáltico é considerado um material auto reparador, capaz de restaurar sua rigidez e resistência quando submetido a períodos de repouso, fechando microfissuras geradas pelo tráfego (TABAKOVIĆ; SCHLANGEN, 2015).

Tabakovic e Schlangen (2015) realizaram uma abrangente revisão bibliográfica para identificar os fatores que exercem influência nas propriedades regenerativas do pavimento asfáltico. No que diz respeito às propriedades do ligante, destacam-se o tipo do ligante, propriedades viscoelásticas, energia livre de superfície, envelhecimento, difusão e a presença de modificadores. Em relação à composição da mistura asfáltica, são considerados fatores como a proporção de ligante, estrutura dos agregados, graduação e espessura. No âmbito ambiental, os autores referenciados observaram a influência de variáveis como temperatura, histórico de carregamento, período de descanso e umidade. Esses elementos formam um conjunto abrangente de fatores que contribuem para as propriedades regenerativas do pavimento asfáltico, conforme exposto pelos autores em sua pesquisa.

Li *et al.* (2023), em sua revisão bibliográfica, destacaram os principais fatores que influenciam o desempenho de reparação de misturas asfálticas, essenciais para prolongar a vida útil dos pavimentos. Os autores agruparam esses fatores em cinco categorias principais:

- i. Tempo de reparação: Há um tempo ideal para reparação. Períodos muito curtos impedem a completa recuperação, enquanto tempos excessivos podem acelerar o envelhecimento do asfalto (NORAMBUENA-CONTRERAS; GONZALEZ-TORRE, 2017; ZHANG *et al.*, 2021).
- ii. Temperatura de reparação: Temperaturas elevadas dentro da faixa de 40,3 °C a 48,7 °C aumentam a difusão molecular, acelerando a reparação (GROSSEGER; GARCIA, 2019; SUN *et al.*, 2018).
- iii. Tipo de mistura asfáltica: Misturas asfálticas convencionais apresentam maior capacidade de reparação inicial, enquanto modificados podem melhorar essa propriedade com o tempo (DING *et al.*, 2022; ZHOU *et al.*, 2020).
- iv. Grau de dano: Danos menores favorecem a reparação, enquanto danos graves podem comprometer permanentemente essa capacidade (LI; GAO; ZHANG, 2020; ZHAO; WANG; WANG, 2023).
- v. Grau de envelhecimento: O envelhecimento reduz a capacidade de reparação devido ao aumento de compostos macromoleculares, embora agentes rejuvenescedores possam amenizar esse efeito (SUN *et al.*, 2022; XIANG *et al.*, 2022).

Fischer (2010) também explica que o ligante desempenha um papel crucial no processo de regeneração do pavimento asfáltico, ocorrendo em nível molecular, onde moléculas quebradas (não associadas) estão disponíveis para formar ligações e cadeias por meio de ligações de hidrogênio.

Liao *et al.* (2024) discutem as diferenças, vantagens e desvantagens entre os processos de reparação autógena (intrínseca) e autônoma (extrínseca). A reparação autógena, que depende das propriedades naturais do material para sanar os danos, é considerada mais promissora, pois apresenta menor complexidade e custo em comparação com a reparação autônoma, que exige a adição de agentes curadores externos, como microcápsulas. Embora a reparação autônoma seja eficaz em determinadas situações, a autógena se destaca por ser uma abordagem mais simples e eficiente. Além disso, os modelos utilizados para avaliar a eficiência da reparação indicam que fatores como tempo e temperatura têm um impacto significativo no processo de cura. Liao *et al.* (2024) ressaltam, no entanto, que ainda há uma lacuna importante na pesquisa atual quanto à consideração de fatores de carga durante a vida útil do material, o que poderia aprimorar a compreensão e a aplicação desses materiais.

3.4.1 Regeneração (*self-healing*) em misturas asfálticas recicladas

O uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) tem sido uma alternativa sustentável na pavimentação, mas ainda há uma lacuna na literatura sobre o comportamento de cura dessas misturas. Mullapudi *et al.* (2020) destacam que a compreensão desse fenômeno é limitada, uma vez que os ligantes presentes no RAP passaram por processos de envelhecimento que modificam significativamente suas propriedades químicas e reológicas em comparação aos ligantes virgens.

A interação entre os ligantes envelhecidos do RAP e os ligantes virgens adicionados na recomposição da mistura é um fator crucial para o desempenho da pavimentação. No entanto, essa difusão ocorre de maneira complexa e não uniforme, impactando diretamente a fadiga e a capacidade de cura da mistura (Mullapudi *et al.*, 2020). Conseqüentemente, os fatores de ajuste entre os resultados de laboratório e o comportamento em campo podem ser diferentes para misturas contendo RAP em comparação às misturas convencionais.

Estudos anteriores já demonstraram que as propriedades químicas e reológicas do ligante influenciam diretamente o desempenho da mistura asfáltica. Daniel e Kim (2002) relataram que o comportamento de cura das misturas pode variar ao longo das diferentes fases do processo. Além disso, García *et al.* (2015) ressaltam que certas características do ligante, como menor ponto de amolecimento, reduzida proporção de metileno para metil, baixo conteúdo anfotérico e elevado teor aromático, tendem a favorecer uma maior capacidade de cura (Kim *et al.*, 1990).

Dado que os ligantes presentes no RAP possuem propriedades muito distintas dos ligantes virgens, torna-se essencial avaliar a relação entre parâmetros químicos, mecânicos e reológicos para melhor compreender a cura dessas misturas (Mullapudi *et al.*, 2020). Dessa forma, a quantificação e caracterização desse fenômeno podem contribuir para o desenvolvimento de técnicas mais eficazes na aplicação de misturas recicladas, aumentando sua durabilidade e desempenho estrutural.

Mullapudi *et al.* (2023) investigaram o potencial de regeneração (*self-healing*) em misturas asfálticas recicladas contendo RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) e observaram que esse potencial diminuiu à medida que a quantidade de RAP na mistura aumentou. A análise da relação entre vida à fadiga e períodos de repouso revelou que a inclinação da curva de fadiga reduziu de 0,7655 para 0,5192 ao aumentar o teor de RAP de 15% para 35%, mantendo-se em 0,5326 para 45% de RAP, evidenciando uma menor capacidade da mistura de recuperar danos acumulados. Além disso, verificou-se que o aumento do teor de RAP também influenciou os valores de energia livre de superfície (SFE), que afetam diretamente a capacidade do ligante de umedecer e aderir às superfícies trincadas. Para a mistura sem RAP, a SFE foi de 21,18 mJ/m², reduzindo para 19,57 mJ/m² com 15% de RAP e chegando a 18,18 mJ/m² com 45% de RAP. Esse aumento da energia livre de superfície comprometeu a eficiência da regeneração, uma vez que dificultou a infiltração do ligante nas fissuras e, conseqüentemente, a recuperação estrutural do material.

Mullapudi *et al.* (2019) investigaram o efeito de agentes rejuvenescedores na capacidade de regeneração (*self-healing*) e no desempenho mecânico de misturas asfálticas contendo RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), analisando sua influência na resistência à umidade, ao afundamento de trilha de roda (rutting) e à trincagem. Os ensaios envolveram a flexão em três pontos (TPB) com aquecimento por indução para avaliar a regeneração, além de testes complementares, como o Hamburg Wheel Tracking Test (HWTT) e o Ensaio de Tração Indireta (IDT). Os resultados indicaram que o uso de rejuvenescedores melhorou a regeneração das misturas recicladas, com a mistura

contendo o rejuvenescedor KA alcançando 72,1% de regeneração inicial, mas reduzindo para 45,2% após cinco ciclos. A mistura de referência (sem rejuvenescedor) apresentou um desempenho inferior, atingindo apenas 31% de regeneração após cinco ciclos, evidenciando a importância desses aditivos na recuperação do material.

Além disso, a adição de 30% de RAP resultou em uma regeneração média de 40%, podendo ser aumentada em até 20% com rejuvenescedores de baixa viscosidade. No entanto, foi observado que, apesar da melhora inicial, o potencial de regeneração diminuiu progressivamente com o aumento dos ciclos de carga. Em relação às propriedades mecânicas, a mistura sem rejuvenescedor apresentou maior rigidez, reduzindo o rutting em 62% e o stripping em 34%, enquanto as misturas com rejuvenescedores demonstraram maior resistência à trincagem. Os autores concluíram que a seleção do rejuvenescedor é fundamental para equilibrar o desempenho mecânico e a regeneração, garantindo misturas recicladas mais eficientes e duráveis ao longo da vida útil do pavimento.

Gómez-Meijide *et al.* (2018) estudaram o impacto do envelhecimento e do teor de RAP na capacidade de regeneração (*self-healing*) de misturas asfálticas por aquecimento eletromagnético para avaliar a eficácia e a eficiência energética desse processo em misturas com diferentes níveis de envelhecimento e proporções de RAP. Para isto, foram realizados ensaios de flexão em três pontos com aquecimento por indução, além de testes reológicos para analisar as mudanças na viscosidade e rigidez do ligante. Os resultados indicaram que o aumento do teor de RAP e o envelhecimento das misturas reduziram a capacidade de regeneração. A mistura de referência (sem RAP e sem envelhecimento) apresentou um índice de regeneração de 66,7%, enquanto misturas com 60% de RAP ou mais tiveram uma queda para cerca de 20%. O envelhecimento também afetou negativamente a regeneração, reduzindo-a de 66,7% para 22,6% após 9 dias de envelhecimento. Os autores concluíram que o envelhecimento e a incorporação de altos teores de RAP comprometem a regeneração das misturas asfálticas, tornando o processo menos eficiente. Como alternativa, sugerem o uso de rejuvenescedores encapsulados para melhorar as propriedades do ligante e garantir uma regeneração mais eficaz ao longo do tempo.

3.4.2 Mensuração da regeneração

Para avaliar a capacidade regenerativa de materiais asfálticos, como ligante asfáltico, mastique asfáltico e mistura asfáltica, foram desenvolvidos diversos métodos

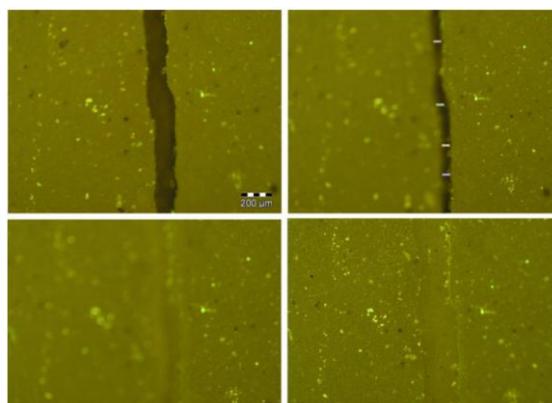
em laboratório, campo e escalas micro, meso e macro, além de simulações computacionais, conforme discutido por Ayar *et al.* (2016). Essas caracterizações geralmente envolvem a comparação da resposta do material, como recuperação mecânica ou resposta físico-química, em diferentes condições de carga e dano, considerando variações de temperatura e períodos com e sem descanso (Sun *et al.*, 2018).

Entre os métodos microescalares, destaca-se a utilização de técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia de força atômica (MFA), sendo esses apenas exemplos, não limitando-se a eles. A MEV é empregada para observar os estágios de cicatrização em nanoescala por meio de imagens, enquanto a MFA é utilizada para medir as forças adesivas e coesivas no material (Qui, 2012).

Qiu *et al.* (2012) propuseram um método microescalar para avaliar a capacidade de regeneração de mastiques asfálticos combinando microscopia de fluorescência com um ensaio de fratura-regeneração-refratura (FHR). O estudo utilizou dois tipos de mastiques asfálticos: um contendo ligante convencional 70/100 (PBmas) e outro com ligante modificado com polímero SBS (SBSmas). O ensaio envolveu a criação de uma trinca controlada, seguida por períodos de regeneração em diferentes temperaturas e tempos, com posterior reavaliação da resistência mecânica do material.

A Figura 9 do estudo apresenta imagens obtidas por microscopia de fluorescência, mostrando a evolução do fechamento da trinca no PBmas ao longo do tempo. Inicialmente, a fissura possuía cerca de 150 μm , mas após 3 horas de regeneração, a trinca desapareceu completamente devido ao seu fechamento total. Essa técnica permitiu visualizar o processo de regeneração em nível microscópico, auxiliando na compreensão do mecanismo envolvido.

Figura 9. Microscopia de fluorescência da amostra de PBmas com diferentes tempos de regeneração (0, 1, 3 e 18 horas).



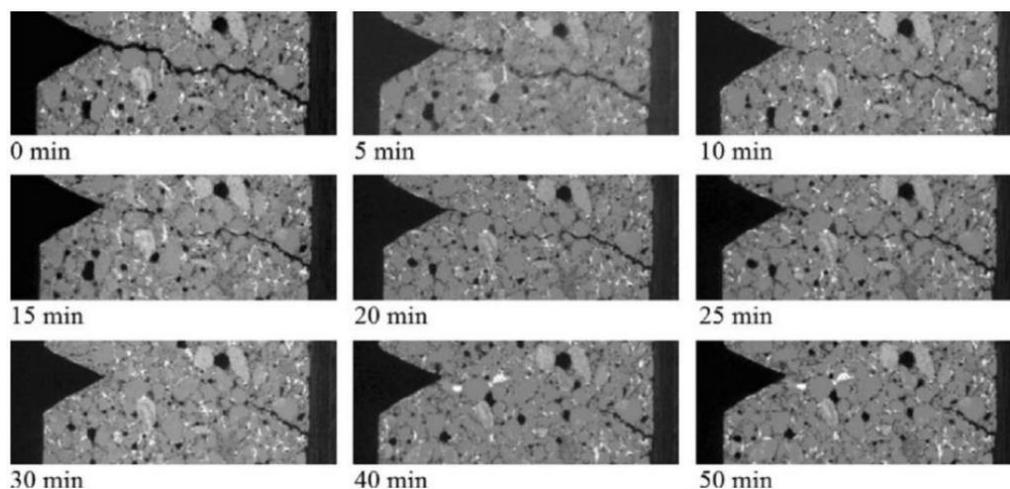
Fonte: Qiu *et al.* (2012).

Os autores concluíram que o processo de regeneração é impulsionado pela viscosidade do ligante, ocorrendo em duas etapas: fechamento da trinca e ganho de resistência mecânica. Além disso, verificou-se que o PBmas apresentou melhor desempenho na regeneração do que o SBSmas, cuja presença do polímero reduziu a taxa de fechamento da fissura, resultando em um menor potencial de regeneração. Esses achados destacam a importância da microscopia de fluorescência como uma ferramenta eficaz para caracterizar a regeneração em misturas betuminosas, fornecendo informações visuais complementares aos ensaios mecânicos tradicionais.

García (2012) estudou o fenômeno de regeneração em mástiques asfálticos, investigando os mecanismos que permitem o fechamento de trincas abertas. O autor destaca que a regeneração do asfalto ocorre predominantemente por dois processos: cura adesiva, que acontece na interface entre o ligante e os agregados, e cura coesiva, que ocorre dentro do próprio ligante betuminoso. Para compreender esses mecanismos, foram avaliadas diferentes metodologias, incluindo técnicas micro e mesoescalares. Dentre os métodos de mesoescala, o estudo menciona tomografia computadorizada (CT-Scan) como uma ferramenta essencial para visualizar a evolução da regeneração ao longo do tempo. A tomografia permite identificar pontos de contato entre as faces da trinca, além de monitorar o fechamento gradual das fissuras sob diferentes temperaturas e tempos de repouso.

No experimento principal, García utilizou mástiques asfálticos contendo ligante betuminoso 70/100, misturados com areia de sílica e fibras condutivas para permitir aquecimento por indução. A Figura 10 do estudo apresenta imagens obtidas por CT-Scan, mostrando a evolução do processo de regeneração em um feixe de mástique asfáltico aquecido a 70°C. Inicialmente, as trincas aparecem bem definidas, com apenas alguns pontos de contato entre suas faces. No entanto, após 5 minutos de aquecimento, foi observada uma redução significativa na área da fissura, com expansão das regiões de contato. O autor destaca que esse fechamento ocorre devido ao fluxo capilar do ligante, impulsionado pela tensão superficial e pela diferença de pressão nos pontos de contato.

Figura 10. Imagens de tomografia computadorizada (CT-Scan) de um dos corpos de prova estudados durante o processo de regeneração.



Fonte: García (2012).

Os métodos em macroescala, como ensaios de fadiga e de fratura, são amplamente empregados, incluindo medições de campo. Esses ensaios, fundamentados no fenômeno de fadiga, revelam a conexão entre a extensão da vida útil sob fadiga e a presença de períodos de descanso, podendo ser interrompidos ou intermitentes.

Os ensaios de regeneração por meio de fadiga ocorrem sob duas condições distintas de carregamento: intermitente ou interrompido. No carregamento intermitente, cada ciclo é seguido por um período de descanso, enquanto nos ensaios interrompidos, as amostras passam por um teste convencional de fadiga e, em seguida, repousam por um período determinado, variando-se os tempos e o nível de dano. Posteriormente, as amostras são reavaliadas no ensaio convencional para verificar a resposta do material (AYAR *et al.*, 2016).

Castro e Sánchez (2006) destacam que os ensaios de fadiga convencionais não refletem com precisão a capacidade de regeneração (*self-healing*) das misturas asfálticas, uma vez que, na realidade, os pavimentos são submetidos a ciclos alternados de carregamento e repouso. Para investigar esse fenômeno, os autores desenvolveram um ensaio de fadiga com períodos de repouso, utilizando o teste de flexão em três pontos para comparar a resistência à fadiga das misturas sob dois regimes distintos: carga contínua e carga intermitente com repouso entre ciclos. Os resultados mostraram que a inclusão desses períodos de repouso aumentou a vida à fadiga das misturas entre 5 e 10 vezes, evidenciando o papel essencial da regeneração na recuperação do material durante os intervalos sem carregamento.

Pivetta *et al.* (2020) investigaram o uso de ensaios de fadiga para prever o comportamento de regeneração em misturas asfálticas, aplicando o modelo S-VECD (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*). O estudo adaptou o ensaio de fadiga uniaxial à tração direta, inserindo períodos de repouso para analisar a capacidade de recuperação do material. A abordagem permitiu quantificar a regeneração com base na curva característica de dano (C vs S), correlacionando os efeitos dos períodos de repouso, temperatura e nível de dano acumulado. Os autores verificaram que a inserção de períodos de repouso resultou em um prolongamento significativo da vida à fadiga, chegando a 25% para ensaios a 30°C com períodos de repouso de 270 segundos. Além disso, foi desenvolvida uma variável de estado de regeneração (H), permitindo prever a recuperação da mistura em diferentes condições de ensaio.

Os estudos citados mostram que a inclusão de períodos de repouso nos ensaios de fadiga é essencial para uma avaliação mais realista da regeneração das misturas asfálticas. Tanto Castro e Sánchez (2006) quanto Pivetta *et al.* (2020) demonstraram que os ciclos intermitentes de carga e repouso favorecem a recuperação do material, resultando em um aumento significativo da vida à fadiga. Dessa forma, a consideração da regeneração nos ensaios laboratoriais é fundamental para prever com maior precisão o comportamento regenerativo das misturas asfálticas e se torna um parâmetro crucial na formulação e modelagem de pavimentos duráveis, contribuindo para o desenvolvimento de estruturas mais resistentes e duráveis.

3.3.2 Modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-VECD)

Pivetta (2018) destaca o modelo S-VECD (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*) como uma abordagem mecanicista robusta para a análise da fadiga de misturas asfálticas, permitindo avaliar a degradação estrutural dos materiais ao longo do tempo e prever sua capacidade de regeneração. Desenvolvido por Daniel e Kim (2002) como uma simplificação do VECD (*Viscoelastic Continuum Damage Model*), o S-VECD aprimora a análise da fadiga ao substituir o regime de carregamento monotônico por um regime cíclico, reduzindo a demanda nos equipamentos de ensaio e facilitando a obtenção de resultados confiáveis.

Uma das principais contribuições do S-VECD é a definição da curva característica de dano (C vs. S), que correlaciona a pseudo-rigidez da mistura com a variável de estado do dano, permitindo uma previsão mais precisa do desempenho da mistura sob diferentes

condições de carregamento. Nascimento e Alberto (2015) complementam essa abordagem, destacando que o modelo, aliado ao critério de falha G_r , aprimora a previsão da vida à fadiga de misturas asfálticas, mesmo considerando ligantes de diferentes propriedades.

A modelagem via S-VECD também permite integrar tempo, temperatura e ciclos de repouso, tornando-se uma ferramenta essencial para prever fadiga e regeneração das misturas asfálticas. Nesse sentido, Almeida Júnior (2022) aplicou o modelo para avaliar o impacto de agentes rejuvenescedores na recuperação da vida à fadiga de misturas 100% RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), validando os resultados com o software FlexPAVETM. O estudo comparou misturas com e sem rejuvenescedores, além da combinação desses aditivos com ligantes altamente modificados (HiMA).

Os resultados reforçaram a aplicabilidade do S-VECD na previsão da fadiga e regeneração, evidenciando que o envelhecimento aumentou a rigidez das misturas, especialmente em altas temperaturas. No entanto, o uso de rejuvenescedores demonstrou ser eficiente na recuperação das propriedades viscoelásticas e na redução da rigidez em temperaturas intermediárias e baixas. Quantitativamente, os rejuvenescedores aumentaram a vida à fadiga das misturas recicladas entre 12% e 16%, dependendo dos critérios de ruptura adotados.

Além disso, a modelagem S-VECD permitiu verificar que a combinação de rejuvenescedores com ligantes altamente modificados resultou em um desempenho equivalente ou superior ao de misturas convencionais com materiais virgens, sem comprometer a resistência à deformação permanente. Demonstrando, assim, que o S-VECD é uma ferramenta eficaz para prever o comportamento à fadiga e otimizar a dosagem de rejuvenescedores.

3.5 INTENSIFICAÇÃO DA REGENERAÇÃO

Apesar da capacidade natural de regeneração dos materiais asfálticos, essa propriedade é limitada em condições de campo devido à falta frequente de temperaturas e períodos de descanso adequados para compensar a deterioração da mistura asfáltica (QIU, 2012). Em busca de aprimorar o processo natural de regeneração, pesquisas recentes, como citadas por Xu *et al.* (2018) se concentraram em tecnologias que buscam modificar fatores internos e externos, como o aumento da temperatura e a redução da

viscosidade do ligante asfáltico. Entre essas abordagens, destacam-se dois métodos: o aquecimento por indução e a utilização de agentes rejuvenescedores encapsulados (AL-MANSOORI *et al.*, 2018; BARROS, 2020; MICAELO; AL-MANSOORI; GARCIA, 2016).

A técnica de aquecimento por indução utiliza partículas condutoras ou suscetíveis a campos magnéticos, como fibras de lã de aço, para aumentar a capacidade regenerativa das misturas asfálticas. Nesse processo, o material é exposto a um campo magnético variável, induzindo corrente elétrica nas fibras, gerando calor que, ao elevar a temperatura do ligante asfáltico, o torna fluido. Isso permite que o ligante flua para as trincas, preenchendo-as e promovendo a regeneração. A técnica demonstrou eficácia em laboratório usando uma máquina de aquecimento por indução com bobina (XU *et al.*, 2018).

Embora o aquecimento por indução apresente benefícios para intensificar o *self-healing* em materiais asfálticos, alguns inconvenientes foram encontrados: aumento do custo devido à adição de fibras condutoras, a onerosidade de dispositivos de indução de calor em campo e a redução momentânea da viscosidade do ligante asfáltico, exigindo possível interrupção do tráfego, são desvantagens consideradas nesse método (XU *et al.*, 2018; AL-MANSOORI, 2018; BARROS, 2020)

Inozemtcev *et al.* (2023) avaliaram a compatibilidade e a eficácia de diferentes agentes de cura encapsulados na mistura asfáltica, destacando a importância da escolha do material para otimizar o processo de regeneração. Segundo o estudo, a regeneração pode ocorrer por dois mecanismos principais: rejuvenescimento da matriz asfáltica, promovido por óleos vegetais, que reduzem a viscosidade do ligante e aumentam a mobilidade molecular; e aglutinação de defeitos, realizada por polímeros, que formam novas ligações adesivas entre as superfícies da fissura durante sua polimerização. Além disso, o estudo reforça que a compatibilidade química entre o agente de cura e o ligante é um fator essencial para maximizar a eficiência do processo regenerativo. O autor também destaca que o aumento da temperatura favorece a regeneração, pois melhora a mobilidade molecular do ligante, facilitando tanto o rejuvenescimento do material quanto a adesão das fissuras.

O conceito dos agentes rejuvenescedores encapsulados envolve “prender” o rejuvenescedor, permitindo sua mistura durante a usinagem da mistura asfáltica. Assim, as cápsulas distribuem-se ao longo da camada de revestimento asfáltico em campo (MICAELO *et al.*, 2016). Com o carregamento do pavimento e o surgimento de

microtrincas, as cápsulas se rompem gradualmente, liberando o rejuvenecedor nas proximidades das trincas devido à concentração de tensões. Esse processo autônomo, ativado pelas passagens dos veículos, visa restaurar as propriedades originais do ligante asfáltico, acelerando o *self-healing* (AL-MANSOORI *et al.*, 2018a).

O estudo de Zhang *et al.* (2024) investigou a resistência à fissuração de microcápsulas incorporadas ao pavimento asfáltico, um dos métodos mais utilizados para aprimorar a capacidade de regeneração desse material. As cápsulas analisadas foram produzidas com agentes rejuvenescedores encapsulados em uma parede de resina, cuja resistência deve ser suficiente para suportar as cargas veiculares antes do surgimento de fissuras no pavimento. Os resultados indicaram que a tensão máxima na parede das cápsulas foi significativamente inferior à sua resistência à tração (~10 MPa), demonstrando que elas não se romperiam sob carregamento veicular nas fases iniciais da vida do pavimento. Os autores concluíram que as microcápsulas podem ser projetadas para liberar o agente de cura apenas quando necessário, contribuindo para a regeneração das fissuras no pavimento. O estudo também destacou a importância da otimização do design dessas cápsulas, considerando fatores como a espessura da parede e o material encapsulante, visando garantir sua eficiência e durabilidade.

Zghoundi *et al.* (2023) revisaram a tecnologia de microencapsulação para regeneração de pavimentos asfálticos, analisando métodos como polimerização interfacial, polimerização *in situ*, gelificação iônica e coacervação. A microencapsulação de agentes rejuvenescedores, como óleos vegetais usados, óleos de cozinha residuais e derivados de petróleo, foi considerada uma abordagem promissora. Os autores mostram que o desempenho das cápsulas depende do equilíbrio entre resistência mecânica e liberação controlada do rejuvenecedor. As cápsulas devem ter alta estabilidade térmica e mecânica, garantindo sua integridade estrutural até o surgimento de fissuras, quando liberam o rejuvenecedor para restaurar a relação asfaltenos/maltenos. Sua incorporação na mistura asfáltica melhorou a vida útil do pavimento, reduziu custos de manutenção e impactos ambientais, reforçando seu potencial sustentável.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica apresentada reforça a importância do estudo sobre a regeneração em misturas asfálticas, especialmente quando associada ao uso de agentes rejuvenescedores encapsulados. As trincas por fadiga continuam sendo um dos principais

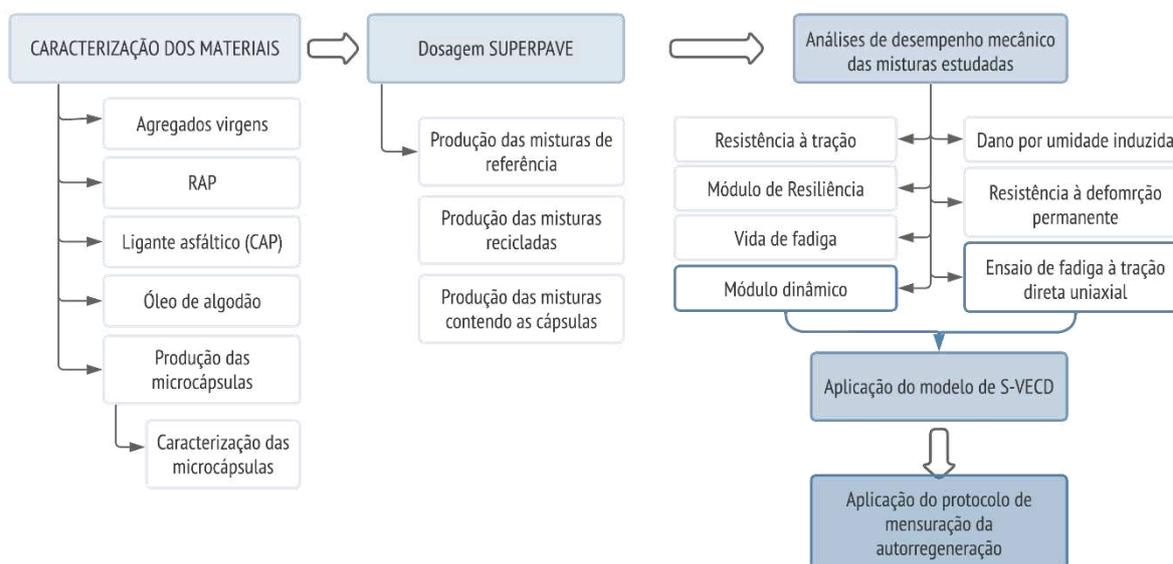
desafios na durabilidade dos pavimentos, tornando essencial a busca por soluções inovadoras que prolonguem sua vida útil de forma sustentável. O reaproveitamento de misturas asfálticas recicladas, aliado ao uso de rejuvenescedores, como óleos vegetais, tem mostrado grande potencial na restauração das propriedades mecânicas do ligante envelhecido. No entanto, a dosagem e a dispersão desses aditivos ainda representam desafios que precisam ser melhores compreendidos para garantir um equilíbrio adequado entre flexibilidade e resistência mecânica.

Nesse contexto, o encapsulamento surge como uma solução promissora, permitindo que os rejuvenescedores sejam liberados de maneira controlada a medida que às fissuras se desenvolvem no pavimento. Esse mecanismo pode potencializar a capacidade de regeneração e reduzir a necessidade de manutenção ao longo do tempo. Também é possível ressaltar a importância da caracterização experimental para avaliar a eficiência deste processo. O modelo S-VECD tem sido amplamente aplicado na análise da fadiga das misturas asfálticas, permitindo uma avaliação mais precisa sobre a degradação estrutural e os efeitos da regeneração. Sua aplicação em ensaios de fadiga à tração direta tem se mostrado fundamental para compreender como diferentes variáveis, como temperatura e tempo de repouso, influenciam a recuperação do material.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos que foram utilizados no desenvolvimento desta pesquisa. A análise dos materiais é fundamental, pois permite determinar suas características e garantir uma seleção adequada para as condições específicas de uso (PIO *et al.*, 2022). Essa etapa é crucial, uma vez que, conforme evidenciado na literatura, as propriedades dos materiais influenciam diretamente as características microestruturais do produto (BRANDON; KAPLAN, 2013). A Figura 11 apresenta um fluxograma relacionando as etapas realizadas para o desenvolvimento desta pesquisa, descritos detalhadamente nos tópicos que seguem.

Figura 11. Fluxograma metodológico da pesquisa.



4.1 MATERIAIS

Os tópicos que seguem apresentam os materiais utilizados, assim como a caracterização destes. Também são especificados os processos de produção das microcápsulas utilizadas neste trabalho.

4.1.1 Agregados virgens

Nesta pesquisa foram empregados agregados virgens graúdos, miúdos e filler para a elaboração da mistura de referência de forma a atender às especificações da faixa C do DNIT. Os agregados graúdos utilizados, brita 19 mm e brita 12,5 mm, foram obtidos na pedreira Rocha Cavalcante, situada em Campina Grande, assim como o agregado miúdo, sendo este o pó de pedra. O *filler*, utilizado foi a cal hidratada (CH-I).

A distribuição granulométrica dos agregados foi determinada de acordo com a norma ASTM C136/C136M-14 - Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. O gráfico apresentado na Figura 12 indica a distribuição granulométrica dos materiais, onde o coeficiente de uniformidade (C_u) indica que a brita 19mm ($C_u=2,65$) é mal graduada, com predominância de partículas graúdas; a brita 12,5mm ($C_u=3,96$) possui melhor distribuição, mas ainda com deficiência de finos; e o pó de pedra ($C_u=8,0$) é bem graduado, contendo partículas de diferentes tamanhos. Os demais resultados de caracterização dos agregados virgens estão apresentados na Tabela 2, juntamente com as respectivas normas que regem os ensaios realizados. Observa-se que todos os agregados avaliados se encontram dentro dos limites estabelecidos pelas normas técnicas.

Figura 12. Curvas de distribuição granulométrica dos agregados virgens.

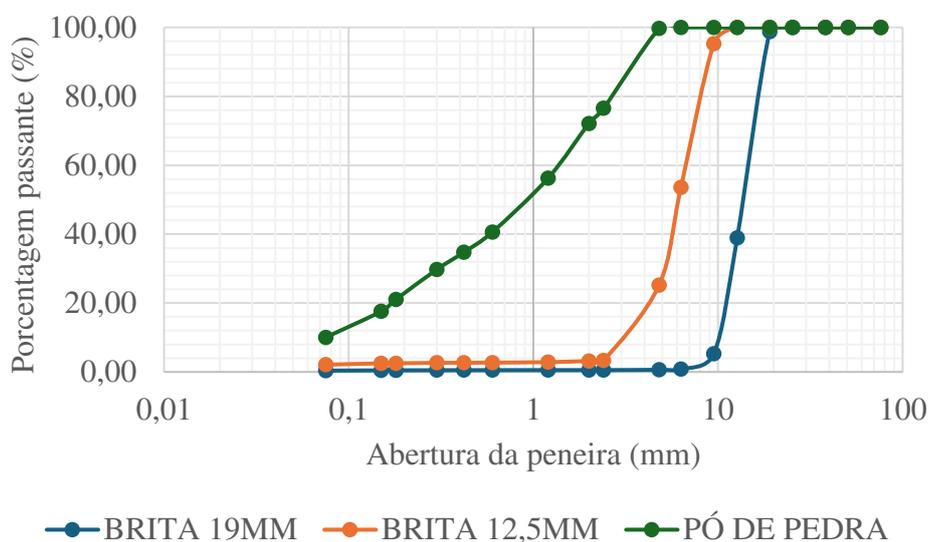


Tabela 2. Caracterização dos agregados.

ENSAIO	NORMA	UND.	ESPECIFICAÇÃO (DNIT 031/2024 – ES)	RESULTADOS		
				Brita 19	Brita 12,5	Pó de Pedra
Massa específica real		g/cm ³	-	2,544	2,752	2,524
Massa específica aparente	ASTM C127:2015	g/cm ³	-	2,511	2,712	2,513
Absorção		%	≤2	0,511	0,533	0,170
Abrasão Los Angeles	ASTM C131:2020	%	≤55	18,5	20,4	-
Índice de Forma	ASTM D 4791/10	%	≥0,5	0,848	0,521	-
Equivalente areia	ASTM D2419:2014	%	≥55	-	-	63
Partículas planas e alongadas	ASTM D 4791:2019	%	≤10	1,13	5,45	-
Partículas fraturadas	ASTM D 5821/13	%	≥90	98,78	99,21	-

4.1.2 Ligante Asfáltico de Petróleo

O ligante asfáltico utilizado na composição das misturas foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) com penetração 50/70. Na Tabela 3 estão descritos os métodos e as

normas aplicadas para a avaliação das propriedades físicas e reológicas do ligante empregado nesta pesquisa. Foram realizados ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e determinação do PG, considerando tanto amostras de CAP virgem quanto envelhecidas em curto prazo, utilizando o procedimento RTFO (Rolling Thin Film Oven). A medição da viscosidade foi feita com um viscosímetro rotacional da marca Brookfield, enquanto os testes reológicos foram executados em um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) Discovery Hybrid Rheometer (DHR-1).

Tabela 3. Ensaios para avaliação das propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico.

ENSAIO	NORMA
Penetração	ASTM D5/D5M:2020
Ponto de Amolecimento	ASTM D36/D36M - 14:2020
Viscosidade Rotacional	ASTM D4402/D4402M:2015
<i>Performance Grade (PG)</i>	ASTM D6373:2021
<i>Rolling Thin Film Oven (RTFO)</i>	ASTM D2872:2019
<i>Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)</i>	ASTM D7405:2020

Os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional são essenciais para avaliar as propriedades do ligante asfáltico em diferentes temperaturas. O ensaio de penetração verifica a consistência do ligante, enquanto o de ponto de amolecimento determina a temperatura em que o material começa a amolecer. O de viscosidade rotacional mede a resistência ao fluxo e é crucial para definir as temperaturas de usinagem e compactação. O Performance Grade (PG) classifica o desempenho do ligante com base em temperatura e tráfego, sendo especialmente importante em climas quentes, como os do Brasil, para garantir a resistência e durabilidade do pavimento.

O RTFO (Rolling Thin Film Oven Test) simula o envelhecimento do ligante asfáltico, reproduzindo as condições de alta temperatura e fluxo de ar durante a fabricação e aplicação. Após o RTFO, realiza-se o MSCR (*Multiple Stress Creep and Recovery*), que avalia o comportamento do asfalto sob 20 ciclos de tensão, simulando o impacto de cargas repetidas no tráfego. O teste fornece dados sobre as compliâncias não-recuperáveis (Jnr), a diferença entre as compliâncias de 0,1 kPa e 3,2 kPa (Jnr diff) e a porcentagem de recuperação elástica (%R), sendo essencial para avaliar a resistência do asfalto à deformação permanente em altas temperaturas e tráfego intenso.

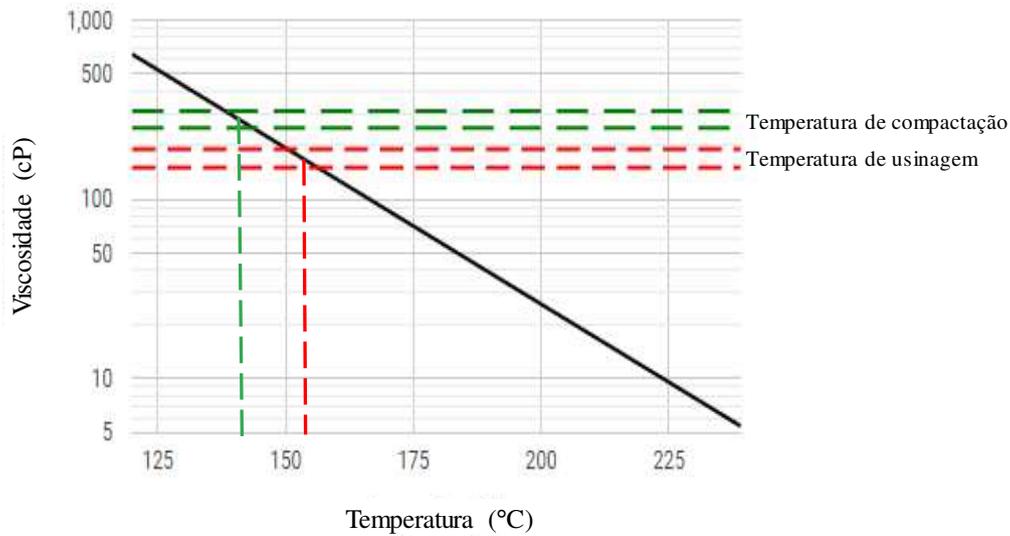
Os resultados dos ensaios de caracterização do ligante estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Caracterização física e reológica do ligante asfáltico virgem.

ENSAIO	RESULTADOS	
Penetração 0,1 mm (100g, 5s a 25°C)	50	
Ponto de Amolecimento (°C)	46	
Viscosidade Rotacional (cP)	135°C	376,63
	150°C	187,86
	177°C	69,29
Performance Grade - High Temperature (°C)	66	
Viscosidade Rotacional (cP) – Pós RTFOT	135°C	500
	150°C	241
	177°C	85
Performance Grade - High Temperature (°C) – Pós RTFOT	64	
MSCR – Pós RTFOT	Jnr a 0,1 kPa	3,21
	Jnr a 3,2 kPa	3,64
	Jnr diff (%)	13,27

Os dados apresentados na Tabela 4 indicam que o ligante asfáltico analisado é apropriado para uso em pavimentação, uma vez que todas as características avaliadas atendem aos critérios definidos para o CAP 50/70, conforme estabelecido pelo DNIT 095/2006. Além disso, o ligante é classificado como PG 64-XX. Segundo a AASHTO M320 (2016), o material utilizado é adequado para rodovias com tráfego de volume padrão (S). Com base nos resultados do teste MSCR (Multiple Stress Creep Recovery), especificamente os valores de Jnr a 0,1 kPa e 3,2 kPa, é possível indicar o tipo de tráfego que o ligante pode suportar. O valor de Jnr a 3,2 kPa, que é de 3,64, sugere uma resistência à deformação permanente adequada para suportar tráfego de intensidade moderada a pesada. Esses resultados permitem classificar o ligante como apropriado para vias com tráfego significativo, garantindo que o pavimento mantenha sua integridade sob cargas repetidas. O relatório NCHRP 648 (2010) aponta que as temperaturas ideais para a usinagem e compactação da mistura asfáltica correspondem a viscosidades de 170 ± 20 cP e 280 ± 30 cP, respectivamente. Com base nas viscosidades obtidas pelo ensaio rotacional a 135°C, 150°C e 177°C, foi elaborada uma linha de tendência exponencial no gráfico de viscosidade versus temperatura, conforme ilustrado na Figura 13 no qual obtemos as temperaturas de usinagem e compactação como sendo de 160°C e 140°C, respectivamente.

Figura 13. Viscosidade do ligante virgem.



4.1.3 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Após o processo de fresagem, o pavimento reciclado (RAP) preserva os componentes originais de sua mistura, tornando necessário realizar a caracterização para avaliar os efeitos causados na estrutura dos agregados. Foram realizados ensaios de determinação do teor de betume, análise granulométrica e determinação das massas específicas, seguindo os procedimentos normativos correspondentes.

A determinação do teor de betume foi realizada por meio de um extrator centrífugo (Rotarex), utilizando o solvente tricloroetileno. Esse processo permite separar o ligante asfáltico dos agregados por meio da centrifugação, identificando o teor de ligante presente no material fresado.

Em seguida, foram determinadas as massas específicas do RAP, incluindo a massa específica máxima teórica, também conhecida como densidade máxima teórica, obtida pelo método Rice (BERNUCCI *et al.*, 2022). Essa propriedade é essencial para avaliar o desempenho estrutural do material em misturas asfálticas recicladas. Além disso, foram calculadas a massa específica efetiva e a massa específica aparente, que levam em consideração as propriedades dos agregados e o teor de asfalto presente no material.

Os resultados desses ensaios, realizados de acordo com as normas técnicas aplicáveis, estão apresentados na Tabela 5. Essa caracterização é fundamental para compreender o comportamento mecânico e a durabilidade das misturas recicladas, auxiliando na formulação adequada para aplicações em pavimentação.

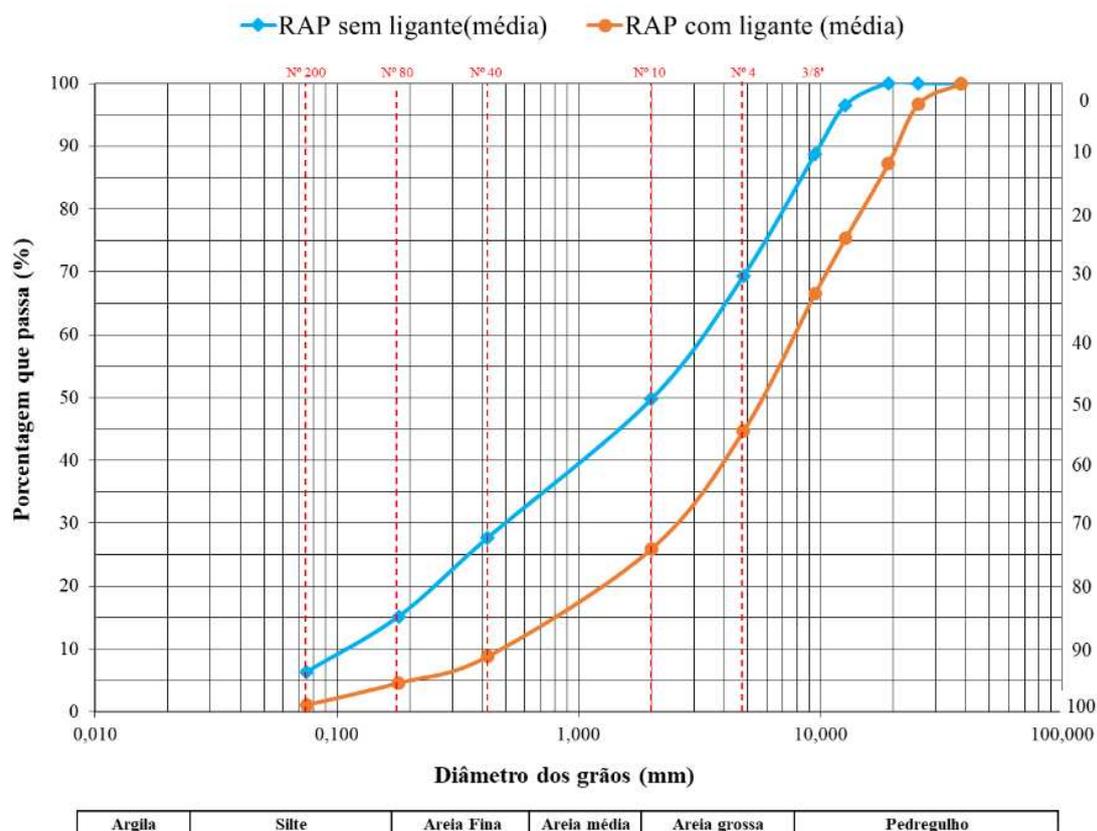
Tabela 5. Caracterização física do material fresado

Caracterização física do material fresado		
Ensaio	Norma Regulamentadora	Resultado
Determinação do Teor de Betume	ASTM D2172 – 05	5,6%
Granulometria	ASTM C136 C136M-14	-
Massa Específica Máxima Medida (G_{mm})	ASTM D2041/D2041M-19	2,512 g/cm ³
Massa Específica Efetiva (G_{se}^{RAP})	Manual Técnico: “ <i>Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement</i> ”	2,700 g/cm ³
Massa Específica Aparente (G_{sb}^{RAP})	<i>in the Superpave Mix Design Method”</i>	2,776 g/cm ³

O ensaio de granulometria foi realizado em duas amostras de RAP, antes e após extração do ligante, isto é importante pois permite avaliar se o processo de fresagem altera a quantidade de finos na amostra e, conseqüentemente, a faixa granulométrica. O ensaio foi executado por meio do processo de peneiramento em uma série de peneiras de malhas quadradas e aberturas pré-definidas e padronizadas.

Os resultados apresentados na Figura 14, obtidos após o ensaio de granulometria em duplicatas mostram as curvas antes e após a extração do ligante. Não se considerou necessário realizar ajustes nas proporções granulométricas do material para realização da mistura asfáltica, visto que os padrões semelhantes no formato das indicam que o ligante estava distribuído “uniformemente” entre os grãos.

Figura 14. Curvas de distribuição granulométrica dos RAP.

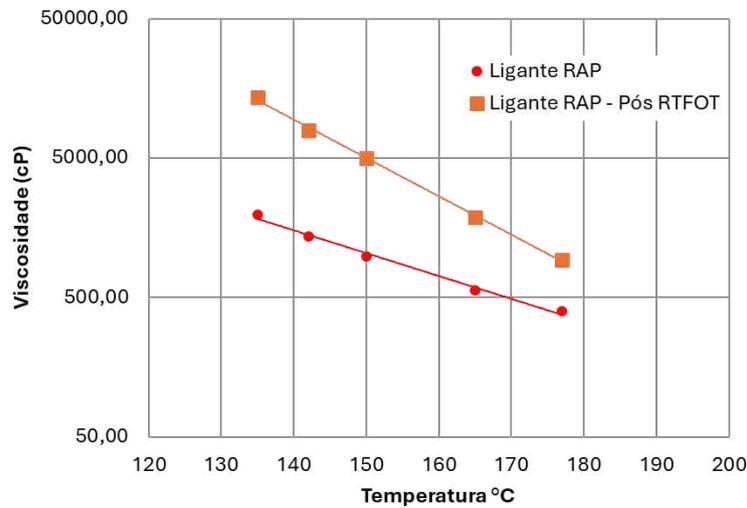


A Tabela 6 e a Figura 15 demonstram os ensaios realizados para caracterização do ligante extraído do RAP, assim como sua caracterização, os procedimentos adotados seguem as mesmas normativas utilizadas na caracterização do ligante virgem. As amostras foram submetidas ao ensaio RTFO a fim de eliminar o solvente residual proveniente do processo de extração e recuperação.

Tabela 6. Caracterização do ligante extraído do RAP.

Ensaio	Und.	Ligante extraído do RAP
Penetração (pós RTFOT)	0,1mm	5
Ponto de Amolecimento	°C	92
Grau de Performance (PG) – high temperature	°C	82

Figura 15. Viscosidade do ligante extraído do RAP.



Quanto aos resultados obtidos na caracterização do ligante extraído do RAP, os valores encontrados para penetração, ponto de amolecimento e viscosidade afirmam a hipótese de que o processo de envelhecimento torna o material rígido, viscoso e pouco suscetível a temperaturas, corroborando com o que é encontrado na literatura.

4.1.4 Óleo de Algodão

O óleo utilizado para a produção das microcápsulas foi o óleo de algodão (Figura 16) um subproduto residual proveniente da fabricação de torta destinada à alimentação de animais ruminantes. Esse óleo foi obtido de uma empresa privada localizada na cidade de Patos, Paraíba. A escolha deste material como agente rejuvenescedor deu-se do fato de que o óleo de algodão apresenta resultados positivos quando incorporado a misturas asfálticas recicladas buscando rejuvenescimento do ligante asfáltico envelhecido (COSTA, 2023).

Figura 16. Óleo de algodão residual.



A viscosidade do óleo foi determinada por meio de ensaios realizados em um viscosímetro rotacional, seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM D7867 (2013). Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Viscosidade do óleo de algodão residual.

ENSAIO	RESULTADOS	
Viscosidade Rotacional (cP)	25°C	77,50
	70°C	27,50
	140°C	20,00

Para a determinação do teor de voláteis do óleo de algodão, o material foi submetido a uma estufa a 140°C por um período de duas horas. Essa temperatura foi escolhida por corresponder à temperatura de compactação de misturas asfálticas, enquanto o tempo de exposição foi definido com base no método Superpave, que estabelece esse intervalo como representativo das condições às quais o material é submetido durante a preparação de misturas asfálticas. O teor de voláteis, calculado pela diferença de massa antes e após o procedimento, foi de aproximadamente 0,94%, valor considerado baixo e adequado para a produção de microcápsulas. Um teor reduzido de voláteis é desejável pois indica maior estabilidade térmica do óleo, essencial para evitar perdas ou reações indesejadas durante o processamento.

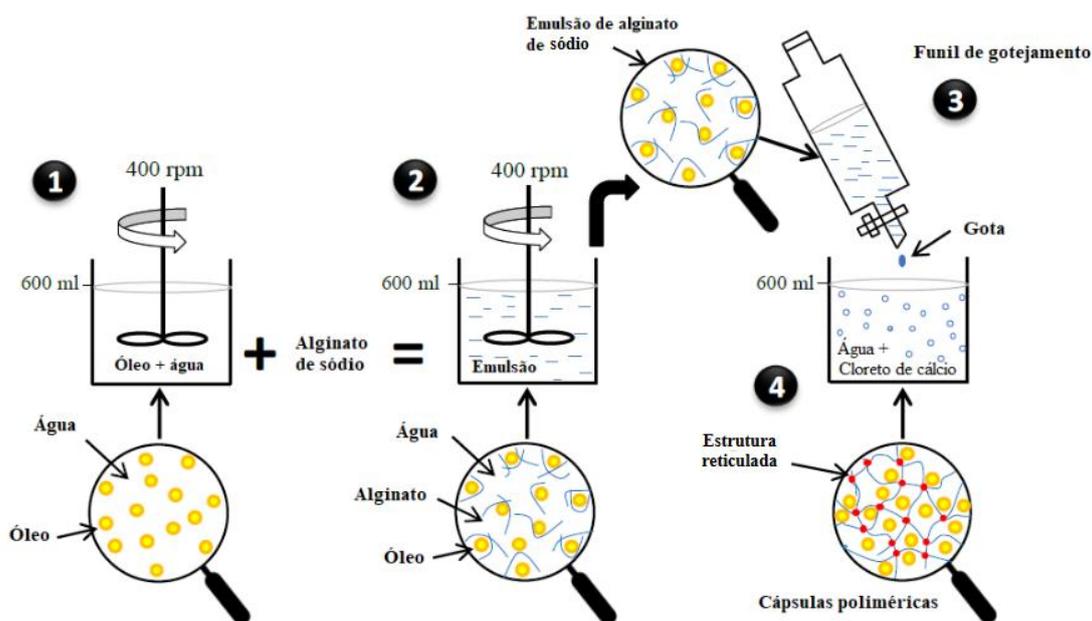
A massa específica do óleo de algodão foi obtida por meio do método de picnometria, resultando em um valor de 0,919 g/cm³.

4.1.5 Cápsulas

As microcápsulas de óleo de algodão foram produzidas utilizando o método de gelificação ionotrópica de alginato na presença de íons de cálcio, conforme descrito por Micaelo, Al-Mansoori e Garcia (2016) e ilustrado na Figura 17. Embora o procedimento

base tenha sido seguido, algumas adaptações foram realizadas para atender às necessidades deste estudo. A principal modificação foi a substituição do agente rejuvenescedor, onde o óleo de algodão substituiu o óleo de girassol utilizado pelos autores. As demais alterações no processo serão detalhadas na descrição do procedimento.

Figura 17. Processo esquemático de fabricação de cápsulas poliméricas por gelificação ionotrópica de alginato.

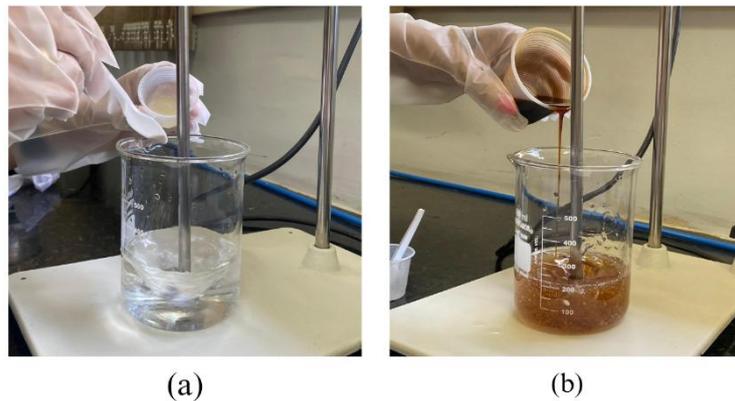


Fonte: Adaptado de Al-Mansoori (2018), por Barros (2020).

As etapas descritas na Figura 17 foram seguidas conforme o procedimento original, com modificações específicas que foram introduzidas neste estudo. As alterações realizadas visaram otimizar a preparação das emulsões e a formação das cápsulas, com foco na obtenção de resultados mais eficientes.

1. **Preparação da Emulsão:** Inicialmente, o alginato de sódio foi misturado à água até sua dissolução completa (Figura 18(a)). Em seguida, foi adicionado o óleo de algodão (Figura 18(b)), alterando o procedimento descrito pelo autor original, que misturou primeiro o óleo com a água. A modificação foi implementada após observações que indicaram um melhor desempenho na dissolução do alginato e na formação da emulsão, sob agitação constante a 400 rpm. O objetivo foi trabalhar com duas proporções distintas de óleo/água (o/a), sendo uma delas a maior proporção possível. As emulsões, com diferentes razões o/a, foram submetidas à próxima etapa.

Figura 18. Procedimento de preparação da emulsão para formação das cápsulas.



2. **Formação das Cápsulas:** A emulsão resultante foi gotejada em uma solução de cloreto de cálcio a 3,5% de concentração. Para preparar 800 ml dessa solução, foi necessário dissolver uma quantidade específica de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, correspondente a 28 gramas. Esta concentração difere do procedimento original, que utilizou 2%. A modificação foi realizada com o objetivo de formar uma membrana de alginato de cálcio mais espessa e resistente, uma vez que a gelificação ionotrópica do alginato, induzida pelo cálcio, favorece a formação de uma rede mais robusta e estável quimicamente. Durante o processo, a solução foi agitada em um agitador magnético para evitar que as gotas se acumulassem, garantindo que cada gota entrasse em contato com a solução individualmente (Figura 19). Esse procedimento promoveu a gelificação ionotrópica, resultando na formação de cápsulas poliméricas.

Figura 19. Processo de gotejamento para formação das cápsulas.



A escolha da proporção óleo/água (o/a) para a formação das emulsões foi baseada em diferentes tentativas, visando obter cápsulas com o maior teor de óleo possível, mantendo a proporção de alginato de sódio. As tentativas estão ilustradas na Figura 20, e as observações feitas em cada caso foram as seguintes:

(a) O/A = 1,0: As cápsulas não se formaram, permanecendo praticamente líquidas devido ao alto teor de óleo.

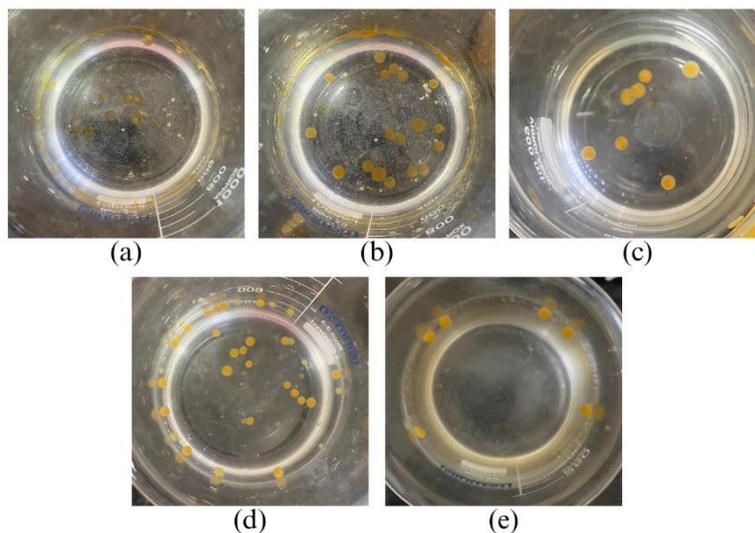
(b) O/A = 0,7: As cápsulas ainda não se formam.

(c) O/A = 0,5: Embora a formação das cápsulas tenha ocorrido, a membrana não apresentou estabilidade.

(d) O/A = 0,4: Embora a formação das cápsulas tenha ocorrido, a membrana não apresentou estabilidade.

(e) O/A = 0,35: As cápsulas se formaram, mas a membrana ainda era instável, o que dificultaria a sua integridade durante a secagem.

Figura 20. Tentativas de confecção de cápsulas em diferentes razões óleo/água.



As características físico-químicas do óleo de algodão, apresentadas na Tabela 1, podem influenciar diretamente o processo de encapsulação por gelificação ionotrópica. A dificuldade em produzir cápsulas de alginato com alto teor de óleo pode estar relacionada à baixa miscibilidade do óleo com a solução de alginato, interferindo na estabilidade da emulsão antes da gelificação. A viscosidade relativamente alta do óleo, somada ao seu índice de acidez, pode comprometer a reticulação do alginato na presença de íons cálcio, dificultando a formação de cápsulas estáveis. Além disso, a presença de compostos insaponificáveis e o alto índice de saponificação, características comuns ao óleo de algodão, podem afetar a compatibilidade do óleo com a matriz polimérica, reduzindo sua

capacidade de encapsulação. Logo, a maior proporção na qual foi possível obter cápsulas com integridade estrutural foi com a razão óleo/água de 0,25, ilustrada anteriormente na Figura 19.

Com base nisso, adotaram-se as razões o/a de 0,15 e 0,25 para as etapas subsequentes, sendo nomeadas, respectivamente, de **Tipo 1** e **Tipo 2**. A razão O/A = 0,15 foi selecionada por oferecer uma distinção adequada em relação a 0,25, garantindo que os efeitos do teor de óleo possam ser analisados de forma comparativa sem que os valores fiquem excessivamente próximos ou distantes. As quantidades foram ajustadas de modo a obter um volume final de 600ml para 15g de alginato de sódio, ainda conforme o procedimento de Micaelo, Al-Mansoori e Garcia (2016).

3. **Cura e Secagem:** Após o término do gotejamento, as cápsulas foram cuidadosamente *filtradas* e lavadas com água destilada. As cápsulas, ainda no estado úmido, foram então deixadas para secar sob correntes de ar geradas por um ventilador, durante um período de 4 a 6 horas. Após a secagem, as cápsulas apresentaram uma redução no volume e adquiriram uma coloração mais escura e translúcida, característica do óleo de algodão utilizado.

4.2 MÉTODOS

Este item descreve os processos empregados na produção e dosagem das misturas asfálticas. Inicialmente são explicados os processos de caracterização das cápsulas produzidas, seguida pela metodologia de dosagem e pelo processo de fabricação das misturas recicladas. Em seguida, é abordado a incorporação das cápsulas nas misturas asfálticas. Por fim, são apresentados os métodos para avaliação das propriedades mecânicas das misturas, assim como os procedimentos utilizados para medir a reparação.

4.2.1 Cápsulas

4.2.1.1 Área das cápsulas

Para determinar a área das cápsulas foram capturadas imagens com um smartphone de alta resolução e processadas no software de código aberto ImageJ®. Cerca de 20 cápsulas de cada categoria foram analisadas. O software utiliza uma referência de escala presente na imagem (neste caso, uma régua) para calcular as dimensões dos objetos

com base na contagem de pixels. O diâmetro das cápsulas foi mensurado e, considerando seu formato aproximadamente circular, a área equivalente foi calculada usando a fórmula da área do círculo ($\pi D^2/4$).

As cápsulas foram analisadas em três condições distintas: úmidas, secas e após o condicionamento em estufa. A análise em estado úmido visou avaliar as dimensões das cápsulas imediatamente após a sua produção, considerando o impacto da presença de umidade. Posteriormente, as cápsulas foram analisadas após o processo de secagem, permitindo investigar a influência da perda de umidade nas suas dimensões e identificando possíveis reduções de tamanho associadas à desidratação. Por fim, as cápsulas secas foram submetidas a um condicionamento em estufa, com o objetivo de verificar a presença de umidade residual que pudesse ter permanecido após a secagem inicial. Esta etapa permitiu avaliar se haveria perda adicional de umidade durante o condicionamento, bem como identificar eventuais alterações dimensionais decorrentes de contração ou expansão do material.

Essa abordagem metodológica possibilitou uma compreensão mais abrangente dos efeitos da umidade e do condicionamento térmico nas propriedades dimensionais das cápsulas. A Figura 21 apresenta as imagens utilizadas no processamento pelo software, e os resultados das medições estão ilustrados no Figura 22.

Figura 21. Cápsulas nos três estados analisados para determinação das respectivas áreas.

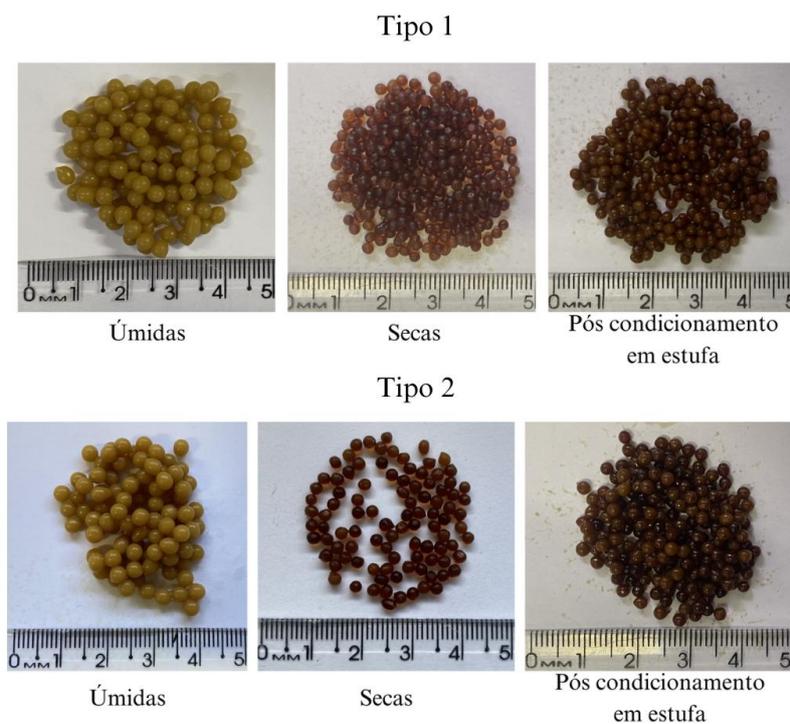
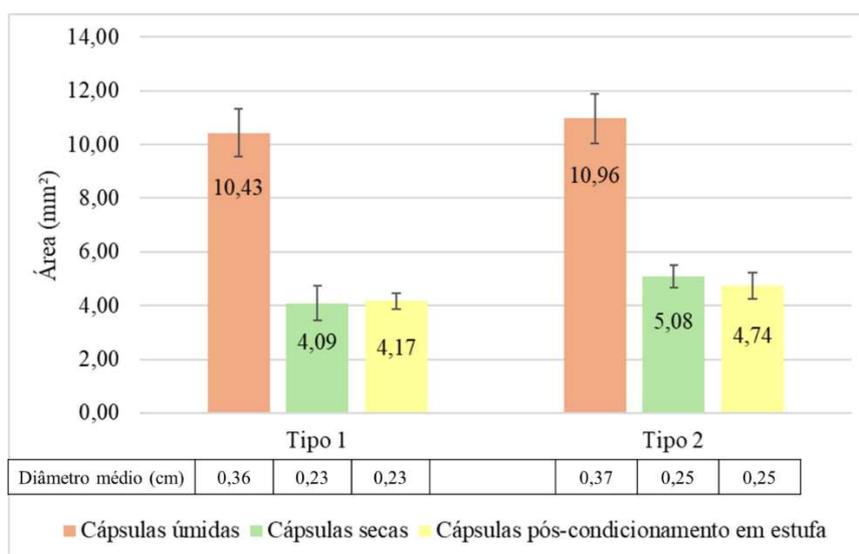


Figura 22. Área das cápsulas.



A análise dos dados foi realizada utilizando o teste ANOVA, que revelou diferenças estatisticamente significativas nas áreas das cápsulas entre os três tipos analisados: Cápsulas Secas, Cápsulas úmidas e Cápsulas Pós Condicionamento em Estufa, para as cápsulas Tipo 1 e Tipo 2. Para ambos os teores, os valores de **p** foram extremamente baixos ($p < 0,05$), indicando que a hipótese nula de que não há diferenças entre os grupos deve ser rejeitada.

Os resultados indicam que o teor de óleo/água utilizado durante a produção das cápsulas é o fator determinante no aumento do tamanho delas. A diferença observada entre as cápsulas secas e úmidas pode ser explicada pela perda de água durante o processo de secagem. Isso ocorreu porque o polímero cálcio-alginato, utilizado na fabricação das cápsulas, é permeável à água, mas não ao óleo. Como resultado, quando as cápsulas ainda estão úmidas, seus tamanhos são semelhantes, mas após a secagem, ocorre uma redução no volume devido à perda de água, o que diminui o tamanho das cápsulas secas. Já as cápsulas úmidas mantêm maior volume devido à presença de água (AL-MANSOORI; NORAMBUENA-CONTRERAS; GARCÍA, 2018).

Adicionalmente, a comparação entre as cápsulas secas e as cápsulas pós-condicionamento em estufa não mostrou diferença estatisticamente significativa. Isso sugere que as cápsulas secas já atingiram seu tamanho final, sem água remanescente para ser perdida durante o processo de secagem. O processo de condicionamento em estufa, que também visa a remoção de água, não altera o tamanho das cápsulas após esse estágio, confirmando que as cápsulas secas estão, de fato, completamente desidratadas e não há mais redução de volume a ser observada.

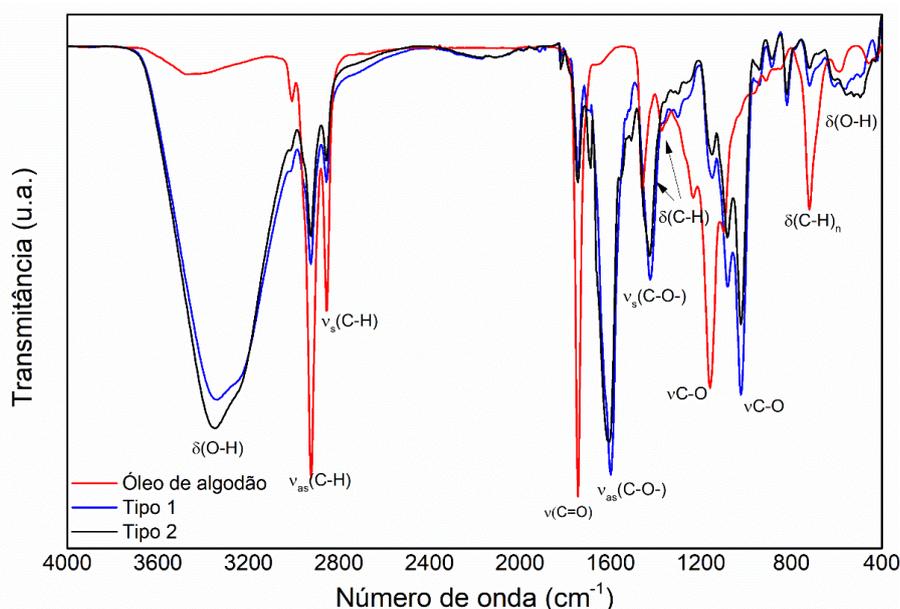
Portanto, pode-se concluir que o teor de óleo/água é o principal fator que influencia o tamanho das cápsulas, com as cápsulas molhadas apresentando as maiores áreas em comparação com as secas e as pós-condicionamento. A ausência de diferença entre as cápsulas secas e pós-condicionamento reforça que as cápsulas secas atingem seu tamanho final e não há mais água a ser removida.

4.2.1.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica analítica baseada na absorção de radiação eletromagnética na região do infravermelho médio (4000 a 400 cm^{-1}). Esta técnica permite analisar os diferentes tipos de ligações e funções químicas nas moléculas contidas nas amostras, especialmente moléculas orgânicas, apresentando picos característicos de vibrações moleculares (estiramentos e deformações). No contexto de ligantes asfálticos, o FTIR é amplamente utilizado para determinar níveis de oxidação e identificar qualitativa e/ou semi-quantitativamente a presença de aditivos orgânicos (PAVIA *et al.*, 2010; SILVESTEIN *et al.*, 2007).

Os ensaios de FTIR foram realizados para as amostras de óleo de algodão e as cápsulas de alginato (Tipo 1 e Tipo 2) contendo o óleo. Os espectros obtidos para estas amostras estão representados na Figura 23.

Figura 23. Espectros de FTIR para as cápsulas com óleo de algodão



Na caracterização do óleo de algodão, os principais sinais indicativos da sua composição aparecem em regiões com picos de alta intensidade. Os estiramentos característicos de grupos alifáticos saturados estão localizados em 2951 cm^{-1} e 2867 cm^{-1} para estiramentos assimétrico e simétrico de grupos metila (CH_3), e em 2919 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} para estiramentos assimétrico e simétrico de grupos metileno (CH_2). Além disso, observa-se um pico em 2890 cm^{-1} associado ao estiramento de grupos metina (CH), parcialmente sobreposto ao pico de 2919 cm^{-1} . O pico em 1745 cm^{-1} indica a presença de grupos carbonilas ($\text{C}=\text{O}$) característicos de ésteres, típicos de óleos ricos em triacilgliceróis. A presença de bandas na região de $1000\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$, associadas a ligações C-O, reforça essa identificação. Além disso, uma banda de baixa intensidade entre $3100\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ e um pico fraco em torno de 1700 cm^{-1} indicam a presença de ligações O-H e $\text{C}=\text{O}$, respectivamente, sugerindo a existência de ácidos graxos em pequena quantidade. Os picos em torno de 1455 e 1365 cm^{-1} estão relacionados às deformações angulares de grupos metileno (CH_2) e metila (CH_3), em conformidade com os estiramentos observados nas regiões de 2919 e 2850 cm^{-1} . O pico em 720 cm^{-1} , referente à vibração do tipo “rocking” para cadeias saturadas longas (CH_2n), confirma a presença de estruturas com $n \geq 4$.

Os espectros das cápsulas (Tipo 1 e Tipo 2) apresentam picos semelhantes aos do óleo de algodão, evidenciando a presença do óleo encapsulado. Ambos os espectros mostram bandas características do alginato, como a intensa absorção entre 3100 e 3600 cm^{-1} , atribuída às vibrações O-H da estrutura do alginato e/ou à presença de água residual (confirmada por uma banda leve abaixo de 600 cm^{-1}). Além disso, os picos em 1614 cm^{-1} e 1426 cm^{-1} são indicativos dos estiramentos assimétrico e simétrico dos grupos carboxilato, fundamentais na estrutura do alginato e na formação da cápsula devido à reticulação com o cálcio. Os picos em torno de 1026 cm^{-1} , associados a ligações C-O, estão relacionados às terminações carboxilato e hidroxilas do alginato.

Ao comparar as cápsulas Tipo 1 e Tipo 2, observa-se que o teor de óleo influencia a intensidade relativa dos picos atribuídos às funções químicas do óleo de algodão. No espectro do Tipo 2 (maior proporção óleo/água), os picos associados às ligações C-H alifáticas ($\sim 2950\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$) e ao grupo carbonila ($\sim 1745\text{ cm}^{-1}$) são ligeiramente mais pronunciados em relação ao Tipo 1, sugerindo uma maior retenção do óleo dentro da matriz polimérica. Por outro lado, os sinais característicos da estrutura do alginato, especialmente os estiramentos O-H e os picos de carboxilato, permanecem semelhantes entre os dois tipos de cápsulas, indicando que a rede polimérica do alginato não sofreu

alterações significativas com o aumento do teor de óleo. Essas diferenças sugerem que um maior teor de óleo pode influenciar a eficiência da encapsulação e a distribuição do óleo dentro da matriz, fatores que podem impactar sua liberação controlada e desempenho como agente rejuvenescedor em misturas asfálticas.

4.2.1.3 Propriedades térmicas

O comportamento térmico das cápsulas foi analisado por meio dos ensaios de análise termogravimétrica (TGA), e análise térmica diferencial (DTA), que permitiram avaliar a estabilidade térmica e os eventos de degradação das amostras em atmosfera oxidante. Os ensaios térmicos foram realizados para as cápsulas Tipo 1 e Tipo 2, com diferentes proporções de óleo em sua formulação. Estas análises têm o objetivo de avaliar se as cápsulas, quando submetidas as temperaturas empregadas na produção das misturas asfálticas, serão comprometidas quanto a sua funcionalidade.

- **Análise Termogravimétrica (TGA)**

Os espectros de TGA mostram que ambas as cápsulas seguem um padrão de perda de massa associado a múltiplos eventos térmicos (Figura 24 e Figura 25). Inicialmente, observa-se uma leve perda de massa (~6,49% para Tipo 1 e ~19,70% para Tipo 2) na faixa de até 200°C, que pode estar relacionada à evaporação de frações mais voláteis do óleo de algodão ou à eliminação de umidade residual. A maior perda inicial para a cápsula Tipo 2 sugere uma maior quantidade de óleo livre ou fracamente retido na matriz polimérica.

Entre 200 e 400°C ocorre uma perda de massa mais significativa (~35,09% para Tipo 1 e ~40,76% para Tipo 2), associada à decomposição térmica do óleo e à possível combustão parcial das cápsulas. Como a atmosfera do ensaio não é inerte, é provável que processos oxidativos tenham contribuído para a degradação antes da temperatura típica de quebra térmica das ligações orgânicas (geralmente acima de 400°C).

Na faixa de 400 a 600°C, observa-se mais uma perda de massa (~23,98% para Tipo 1 e ~25,66% para Tipo 2), indicando a combustão completa do material orgânico remanescente. Finalmente, acima de 700°C, a perda de massa residual (~14,26% para Tipo 1 e ~10,73% para Tipo 2) pode estar associada à conversão de carbonatos em óxidos, particularmente à formação de óxido de cálcio a partir do alginato de cálcio. A Figura 26 apresenta a comparação entre os perfis de perda de massa para os dois tipos de cápsulas.

Figura 24. Gráficos de TGA e DTA das cápsulas do Tipo 1.

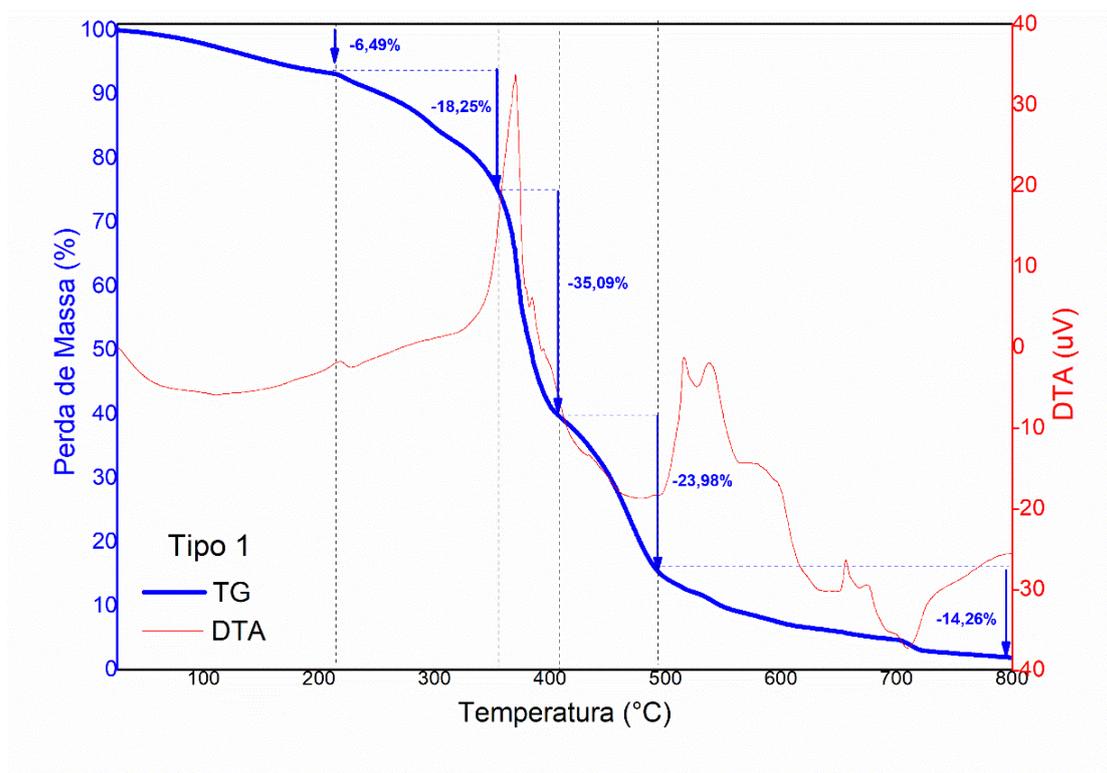


Figura 25. Gráficos de TGA e DTA das cápsulas do Tipo 2.

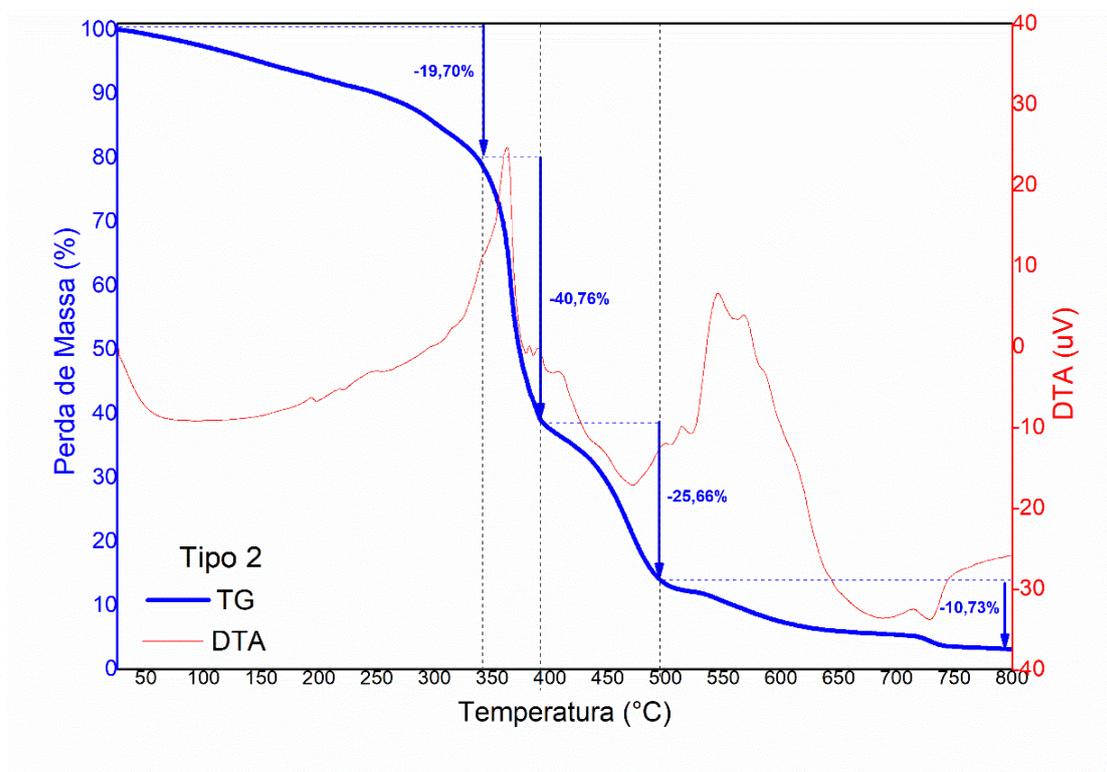
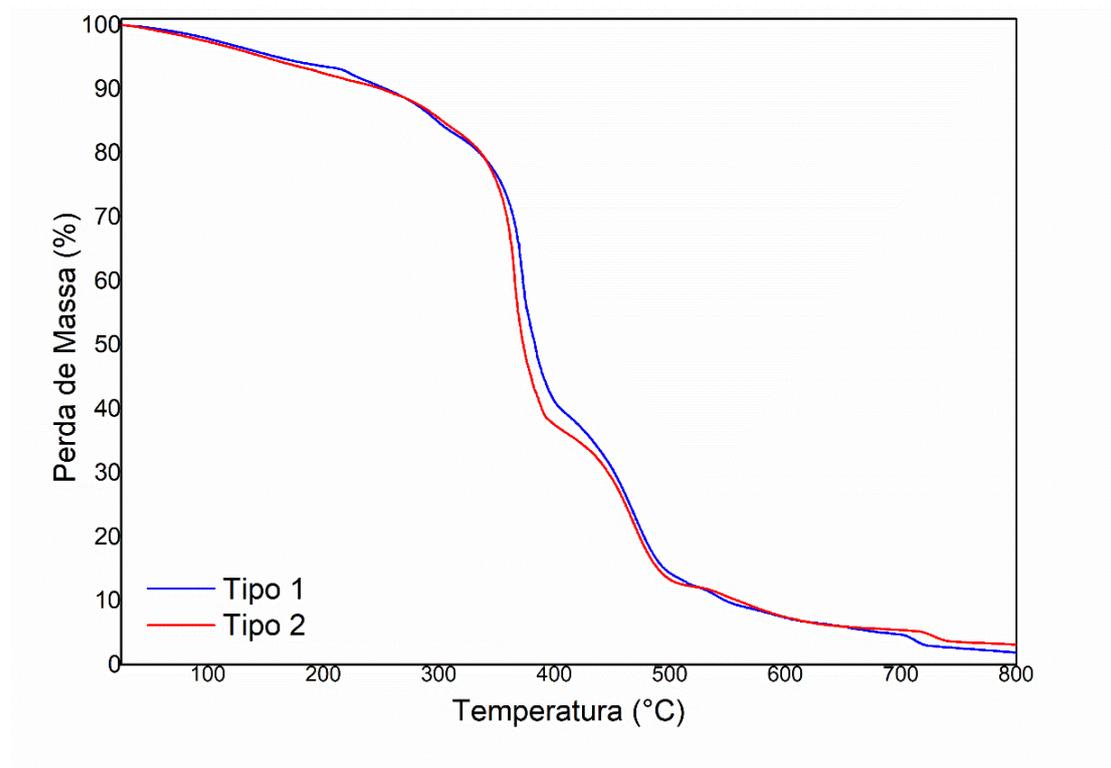


Figura 26. Comparação entre os perfis de perda de massa para os dois tipos de cápsulas.



- **Análise Térmica Diferencial (DTA)**

As curvas de DTA (Figura 24 e Figura 25) apresentam eventos endotérmicos e exotérmicos ao longo do aquecimento. O primeiro vale endotérmico, presente em ambas as cápsulas, indica a absorção de energia associada à vaporização do óleo. Esse processo é mais intenso na cápsula Tipo 2, evidenciando a maior quantidade de óleo presente.

Em seguida, observa-se um pico exotérmico acentuado, compatível com a combustão da cápsula, correspondendo à perda abrupta de massa observada na TG (~60% do peso inicial). Esse evento ocorre em temperaturas ligeiramente menores na cápsula Tipo 2, sugerindo que o maior teor de óleo pode estar facilitando a ignição e a degradação térmica do material.

Após esse evento principal, há um novo vale endotérmico, possivelmente relacionado à quebra de ligações residuais na matriz carbonizada. Por fim, um segundo pico exotérmico pode indicar a queima de resíduos carbonáceos restantes, levando à formação de óxido de cálcio.

A principal diferença observada entre as cápsulas está na intensidade e temperatura dos eventos térmicos. A cápsula Tipo 2, com maior teor de óleo, apresenta perdas de massa mais acentuadas, com uma degradação térmica iniciando em

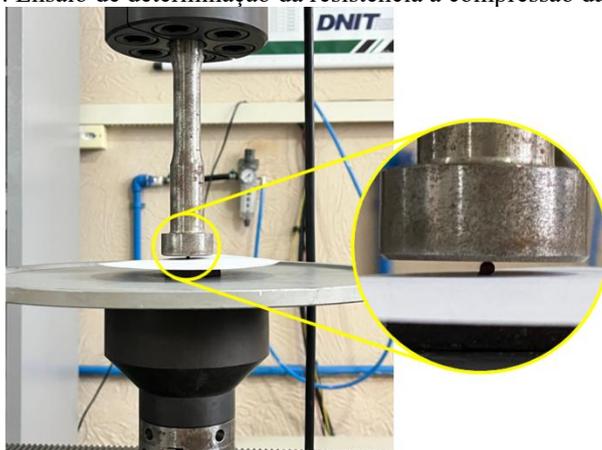
temperaturas ligeiramente mais baixas, o que sugere uma menor estabilidade térmica. Além disso, a combustão da cápsula ocorre de maneira mais intensa e rápida na Tipo 2, o que pode ser atribuído à maior quantidade de óleo disponível para atuar como combustível.

Esses resultados indicam que o teor de óleo influencia a degradação térmica das cápsulas, sendo um fator determinante para sua estabilidade térmica e comportamento em aplicações que envolvem temperaturas elevadas, como sua incorporação em misturas asfálticas. Os resultados obtidos, na faixa de temperatura utilizada para usinagem e compactação (140 – 160°C), indicam que ambas as cápsulas ainda mantêm sua integridade estrutural, sem apresentar degradação significativa. No entanto, a cápsula Tipo 2, por conter um maior teor de óleo, pode apresentar uma leve evaporação de frações voláteis, o que deve ser considerado na avaliação da liberação controlada do óleo. A estabilidade térmica das cápsulas nessa faixa é um fator determinante para seu desempenho como agente rejuvenescedor em misturas asfálticas.

4.2.1.4 Resistência à compressão

A resistência à compressão das cápsulas foi determinada por meio de um ensaio de compressão uniaxial. Aproximadamente 15 cápsulas de cada tipo foram testadas à temperatura ambiente de 25°C. Utilizou-se uma prensa hidráulica Shimadzu com sistema servo-hidráulico, permitindo o controle preciso da carga aplicada. As cápsulas foram comprimidas até a ruptura a uma velocidade constante de 0,5 mm/min (Figura 27). Durante o teste, foram registrados tanto a força de compressão quanto as deformações correspondentes, permitindo uma análise detalhada do desempenho mecânico das cápsulas.

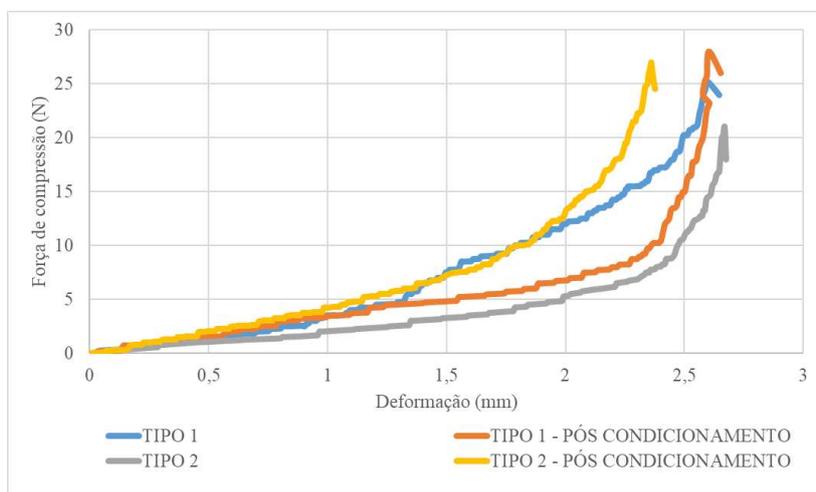
Figura 27. Ensaio de determinação da resistência à compressão das cápsulas.



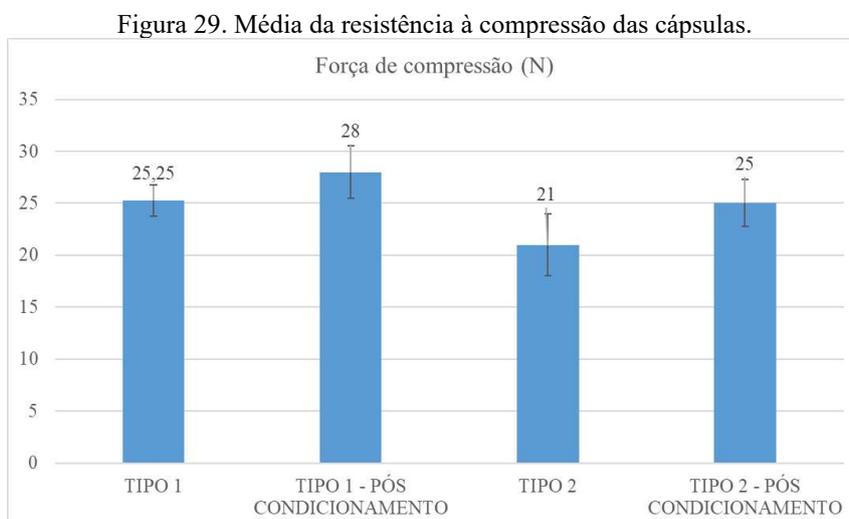
A falha das cápsulas foi analisada por meio do gráfico que relaciona a força de compressão com a deformação das amostras. A Figura 28 mostra o gráfico com os resultados de um ensaio realizado para cada tipo de cápsula estudada. No gráfico, é possível observar um pico de força. Após o pico, as cápsulas sofrem deformações não elásticas e se rompem aos poucos, liberando o agente rejuvenescedor.

Para verificar o impacto do tempo e da temperatura durante a usinagem, as cápsulas foram submetidas a um condicionamento em estufa a 160°C por 2 horas, simulando as condições de usinagem usadas na pesquisa. Esta abordagem foi adotada após a observação de que as cápsulas apresentaram um comportamento de ruptura diferente (perceptível ao toque) após a usinagem e compactação, o que levou à hipótese de que tais variáveis poderiam alterar a forma de ruptura e a resistência das cápsulas.

Figura 28. Resistência à compressão das cápsulas.



A Figura 29 apresenta a média dos resultados obtidos, assim como seus respectivos desvio-padrão.



A análise dos dados de resistência à compressão das cápsulas de Tipo 1 e Tipo 2 permitiu compreender melhor os efeitos do teor de óleo e do condicionamento nas propriedades mecânicas desses materiais. Em relação à comparação entre Tipo 1 e Tipo 2 em condições não condicionadas, observou-se uma diferença significativa entre as resistências à compressão dos dois tipos de cápsulas. O Tipo 1, que contém menos óleo, apresentou uma resistência maior do que o Tipo 2, sugerindo que a quantidade de óleo pode influenciar negativamente na resistência à compressão, este comportamento está de acordo com o encontrado na literatura (AL-MANSOORI *et al.*, 2018).

Quanto ao efeito do condicionamento nas cápsulas, os resultados indicaram que o Tipo 1 não apresentou uma alteração significativa na resistência após o condicionamento, com um valor de t de -0,68 e valor p de 0,50, o que implica que o condicionamento não teve um efeito substancial sobre a resistência à compressão desse tipo. Em contrapartida, para o Tipo 2, o condicionamento teve um impacto significativo, com um valor de t de -8,18 e valor p inferior a 0,05, indicando que o condicionamento alterou de forma considerável a resistência à compressão.

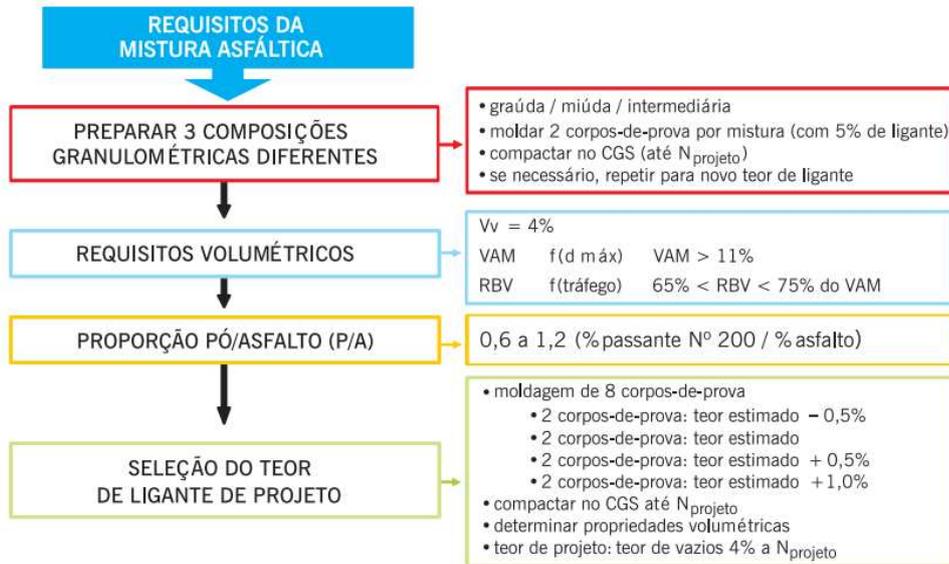
Dessa forma, pode-se concluir que o condicionamento afetou mais o Tipo 2 do que o Tipo 1, e que o teor de óleo presente nas cápsulas desempenha um papel crucial na resistência à compressão.

Em pesquisa realizada por García *et al.* (2010) sobre a caracterização de cápsulas com rejuvenescedores foi determinado que a resistência à compressão mínima necessária para que as cápsulas suportem os processos de usinagem e compactação é de 10N. Dessa forma, pode-se concluir que todas as cápsulas analisadas são capazes de resistir a estas etapas do processo.

4.2.2 Dosagem Superpave

Para o estudo do comportamento das misturas asfálticas optou-se pela utilização de mistura asfáltica à quente, com dosagem baseada na metodologia Superpave. Os processos que definem a execução desta metodologia estão descritos no fluxograma da Figura 30.

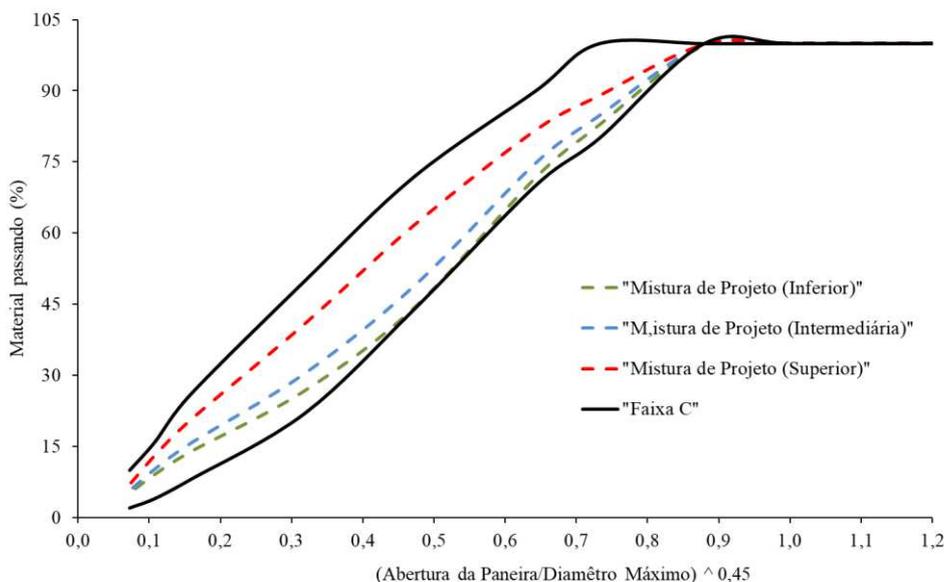
Figura 30. Fluxograma da dosagem Superpave



Fonte: Bernucci *et al.* (2022).

O nível de tráfego adotado foi médio a alto, e o tamanho máximo nominal (TMN) foi de 19,0 mm, conforme os materiais descritos no Tópico 4.1.1. A primeira etapa do processo de dosagem consistiu na definição de três composições granulométricas distintas, as quais foram obtidas a partir da ponderação da granulometria dos agregados em uma única curva. Essas composições foram denominadas "curva inferior", "curva intermediária" e "curva superior", conforme apresentado na Figura 31, e enquadraram-se dentro dos limites da faixa C da norma DNIT 031/2006 para misturas asfálticas.

Figura 31. Curvas Fuller da dosagem Superpave.



A escolha das proporções dos agregados foi realizada de maneira a adequar as misturas aos requisitos da metodologia SUPERPAVE e às especificações da faixa C do DNIT, com o objetivo de garantir a conformidade com os critérios de desempenho para o nível de tráfego definido. Nesta fase foram moldados dois corpos de prova (CPs) para cada curva granulométrica, utilizando três diferentes níveis de esforço de compactação: $N_{inicial}$, $N_{projeto}$ e $N_{máximo}$. Esses esforços, correspondentes a 8, 100 e 160 giros, são aplicados conforme o nível de tráfego médio a alto. O $N_{projeto}$ foi empregado para a definição do teor de ligante ideal, enquanto o $N_{inicial}$ e o $N_{máximo}$ serviram para avaliar a capacidade de compactação da mistura. Após a compactação dos corpos de prova de cada composição, com um teor inicial ligante asfáltico calculado de acordo com as propriedades físicas dos agregados de 4,2%, foi realizada a avaliação dos parâmetros volumétricos das misturas. A partir dessa análise, observou-se que a composição intermediária foi a que se aproximou dos requisitos da metodologia SUPERPAVE, tendo em vista que foi a única que passou no critério pó/asfalto, conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetro das misturas inferior, intermediária e superior.

DENOMINAÇÃO DA MISTURA	% de ligante	%Gmm @ $N_{inicial}$	%Gmm @ $N_{projeto}$	%Gmm @ $N_{máx.}$	%Vv	%VAM	%RBV	%P/A
INFERIOR	4,2	86,5	95,31	97,2	4,2	9,34	57,18	1,26
INTERMEDIÁRIA	4,2	87,4	94,69	97,2	5,5	10,25	60,99	1,18
SUPERIOR	4,2	89,1	94,21	96,7	6,7	8,69	53,95	1,34
CRITÉRIO SUPERPAVE	-	≤ 89,00	96	≤ 98,00	4%	Min. 15%	75% - 82%	0,6-1,2

Como a curva intermediária foi a única que atendeu ao parâmetro de pó/asfalto, optou-se por utilizar essa composição. Com base nos dados de compactação, foi calculado o teor de ligante estimado para essa mistura, com o objetivo de obter 4% de volume de vazios. A partir desse teor estimado, buscou-se determinar o teor ótimo de ligante. Conforme recomendado pela metodologia, foram testados teores de ligante variando em $\pm 0,5\%$ e $+1\%$ em relação ao teor estimado, resultando nos valores de 4,3%, 4,8%, 5,3% e 5,8%. Foram confeccionados 3 corpos de prova para cada teor e, conforme apresentado na Tabela 9, o teor de 4,8% atendeu aos critérios de 96% de densidade relativa máxima teórica (%Gmm) e 4% de volume de vazios. Dessa forma, 4,8% foi definido como o teor ótimo de ligante para a mistura. A Tabela 10 apresenta os percentuais em massa de cada material usado nessa mistura.

Tabela 9. Parâmetro volumétricos das misturas com variação no teor de ligante.

TEOR DE LIGANTE	%Gmm	%Vv	%VAM	%RBV
4,3%	94,9	5,1	14,8	66,4
4,8%	96,1	4,0	15,1	75,3
5,3%	98,6	1,4	14,0	98,6
5,8%	98,8	1,2	14,5	98,8
CRITÉRIO SUPERPAVE	96	4%	Min. 15%	75% - 82%

Tabela 10. Percentuais em massa da mistura asfáltica dosada.

MATERIAL	BRITA 19MM	BRITA 12,5MM	PÓ DE PEDRA	FÍLLER	CAP 50/70
% EM MASSA	23,8%	33,3%	37,1%	1,0%	4,8%

As etapas seguintes descrevem os procedimentos adotados para confecção dos demais tipos de misturas, cujas nomenclaturas e observações estão explícitas no Quadro 1.

Quadro 1. Nomenclatura das misturas asfálticas estudadas.

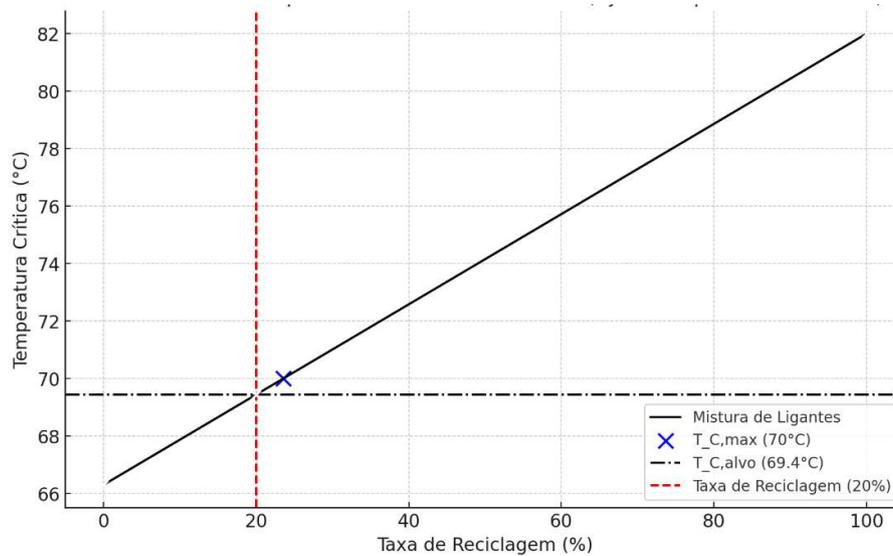
NOME DA MISTURA	COMPOSIÇÃO
REF	Agregados virgens
RAP	Agregados virgens + 20% RAP
R-C-1	Agregados virgens + 20% RAP + Cápsulas Tipo 1
R-C-2	Agregados virgens + 20% RAP + Cápsulas Tipo 2

4.2.3 Produção das misturas recicladas

Para a dosagem das misturas asfálticas recicladas, foi elaborado o *blend chart* utilizando o Método B - Superpave, que permite a determinação da proporção ideal de materiais reciclados (RAP) a ser incorporada à mistura. Este método baseia-se na relação entre a temperatura crítica do ligante asfáltico e a taxa de reciclagem, proporcionando uma análise mais precisa do desempenho da mistura em condições de serviço.

O *blend chart* foi elaborado simulando uma temperatura crítica máxima de 70°C, valor definido com base nas condições climáticas predominantes no Brasil. Esse referencial foi adotado considerando o mapa de PG elaborado por Faccin *et al.* (2021), que utiliza dados de estações climatológicas brasileiras de, no mínimo, 10 anos, com grau de confiabilidade de 98%, e aplica equações para o cálculo das temperaturas de pavimento. Conforme ilustrado na Figura 32, observa-se que o PG - High Temperature de 70°C é o valor mais alto aplicado ao território nacional, o que justifica a escolha dessa temperatura crítica como referência para garantir a resistência adequada da mistura às condições térmicas e de carregamento aplicadas.

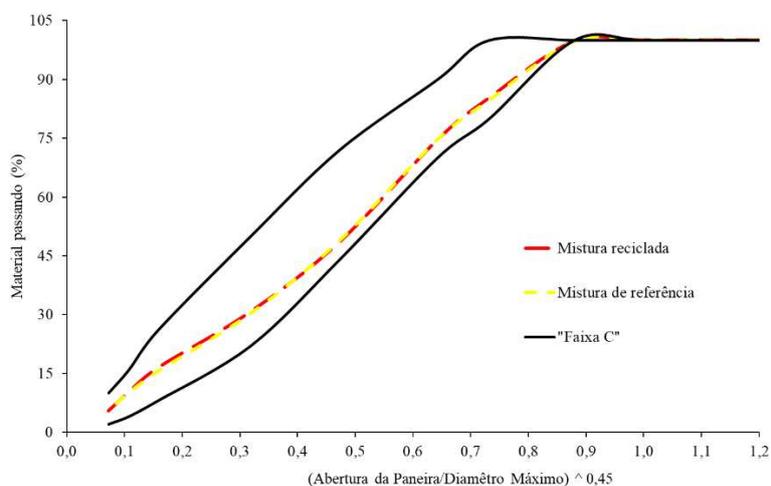
Figura 33. Blend chart da mistura reciclada.



A partir da análise do gráfico, observou-se que a taxa de reciclagem correspondente ao PG máximo de 70°C seria de aproximadamente 23,6%. No entanto, considera-se que o PG do ligante envelhecido do RAP pode ter apresentado uma pequena variabilidade em seu resultado, possivelmente devido à presença de solvente residual oriundo do processo de extração. Essa variabilidade pode influenciar a precisão da determinação do PG do RAP. Diante disso, optou-se por adotar uma taxa de reciclagem de **20%**, buscando maior segurança na estabilidade do desempenho da mistura asfáltica.

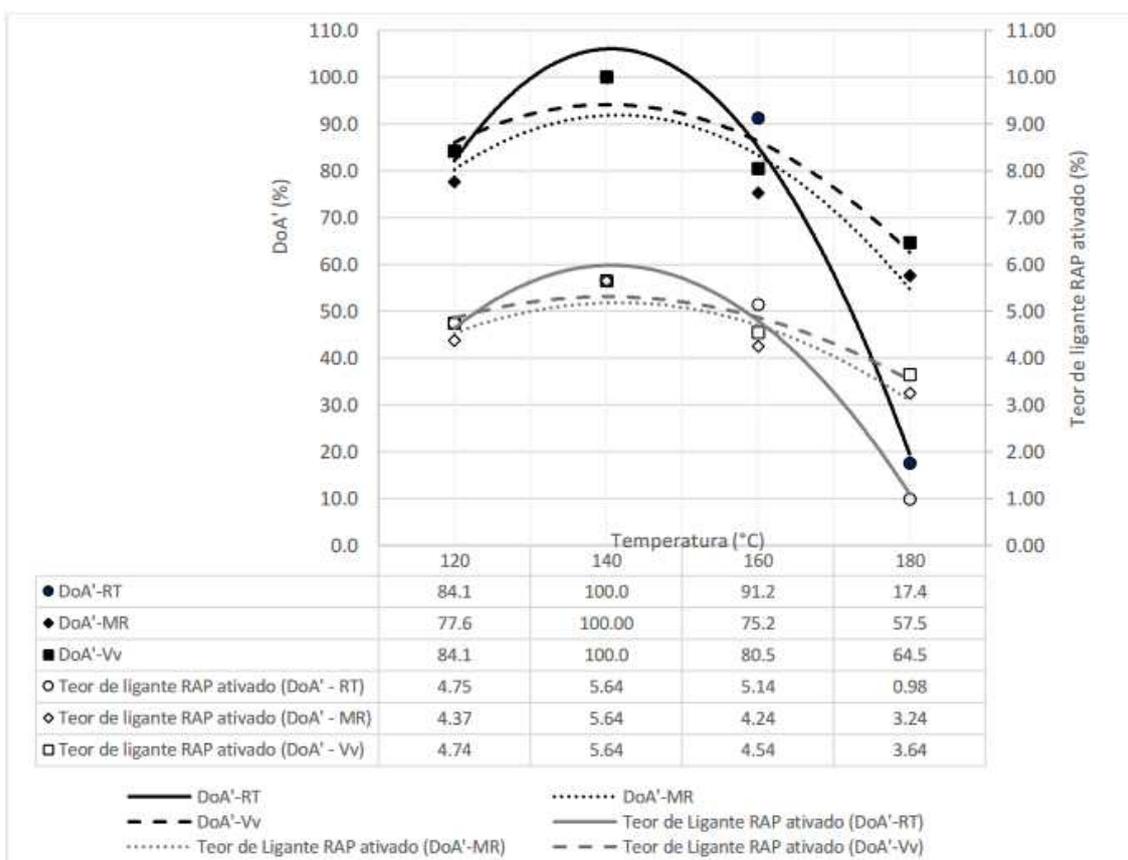
Para assegurar a compatibilidade com a composição granulométrica da mistura asfáltica de referência, a mistura com RAP foi ajustada para atender aos requisitos da Faixa C da norma DNIT. Esse ajuste buscou manter a proximidade com a curva intermediária selecionada anteriormente, conforme ilustrado na Figura 34, permitindo uma comparação direta e consistente entre as misturas.

Figura 34. Curva Fuller da mistura reciclada.



Para ajustar o teor de ligante na mistura reciclada, de modo que esta apresentasse um teor final de ligante o mais próximo possível da mistura de referência, foi considerado o teor de ligante presente no RAP. Assim, o cálculo das proporções foi realizado considerando que os 20% de RAP continham 5,6% de ligante asfáltico, baseado no ensaio de determinação deste teor (Tópico 4.1.3.1). De acordo com o estudo realizado por Costa (2023), com o mesmo material, o grau de ativação deste para uma temperatura de 140°C é de 100%, logo o material apresentou total ativação, conforme ilustrado na Figura 35.

Figura 35. Grau de ativação do ligante RAP.



Fonte: Costa (2023).

As quantidades dos materiais foram, então, ajustadas para garantir que a composição final resultasse em um teor de ligante de 4,8%, equivalente ao da mistura de referência. A Tabela 11 apresenta a composição, em massa, dos materiais utilizados nessa mistura.

Tabela 11. Percentuais em massa da mistura asfáltica reciclada.

MATERIAL	RAP	BRITA 19MM	BRITA 12,5MM	PÓ DE PEDRA	FÍLLER	CAP 50/70
% EM MASSA	20,2%	21,9%	28,6%	24,8%	1,0%	3,7%

Os parâmetros volumétricos foram avaliados para verificar se a mistura reciclada apresentava comportamento semelhante ao da mistura de referência. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Parâmetros volumétricos da mistura asfáltica reciclada.

MISTURA	TEOR DE LIGANTE	%GMM	%VV	%VAM	%RBV
MISTURA DE REFERÊNCIA	4,8%	96,1	4	15,1	75,3
MISTURA RECICLADA	4,8%	95,8	4,3	16,3	74,0

Devido à semelhança com os parâmetros da mistura de referência, apresentando pequena variação, provavelmente proveniente da heterogeneidade do material, o teor de 4,8% foi utilizado também como teor ótimo na mistura reciclada, levando também em consideração a posterior incorporação de agentes rejuvenescedores nessa mistura que, em complemento a alta temperatura de trabalho, tende a favorecer ainda mais a ativação do ligante RAP.

4.2.4 Incorporação das cápsulas na mistura asfáltica

O teor de adição das cápsulas seguiu a metodologia proposta por Norambuena-Contreras *et al.* (2019), consistindo na incorporação de 0,5% de cápsulas em relação à massa total da mistura asfáltica. Com base na quantidade de óleo presente nas cápsulas e na dosagem utilizada, essa adição teórica corresponderia a uma determinada proporção de óleo na mistura. Contudo, levantou-se a hipótese de que nem todo o óleo presente nas cápsulas seria liberado, podendo uma parte ser retida pela membrana. Assim, para testar essa hipótese, foi realizado um experimento no qual as cápsulas foram submetidas a compressão em uma prensa hidráulica equipada com superfícies absorventes, até que ocorresse a extrusão completa do óleo, restando apenas a membrana. Foram registradas as massas das cápsulas antes e após o processo, e a massa perdida foi considerada como a quantidade "real" de óleo liberado. O teste indicou que, em média, 60% do óleo foi liberado para as cápsulas dos tipos 1 e 2. Os dados relativos a esse processo estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Quantificação da liberação de óleo pelas cápsulas após compressão.

CÁPSULAS	TIPO	TIPO
	1	2
Quantidade de cápsulas em relação a massa total da mistura asfáltica	0,5%	0,5%
Quantidade teórica de óleo na cápsula	83,91%	88,9%
Quantidade teórica de óleo em relação a massa de ligante asfáltico	8,73%	9,25%
Quantidade real de óleo em relação a massa de ligante asfáltico	5,24%	5,56%

A Tabela 13 apresenta as informações detalhadas sobre a liberação de óleo pelas cápsulas, incluindo a quantidade real de óleo liberado após o processo de compressão e extrusão, em comparação com a quantidade teórica inicialmente calculada. A interpretação desses dados permite uma análise mais precisa da efetividade da liberação de óleo pelas cápsulas.

Durante a usinagem da mistura asfáltica, após garantir que os agregados e o ligante asfáltico estavam completamente homogêneos, as cápsulas foram incorporadas. A seguir, a mistura foi realizada manualmente para assegurar que as cápsulas fossem distribuídas uniformemente por toda a mistura asfáltica. Em seguida, as misturas foram compactadas no CGS seguindo o mesmo procedimento usado para as misturas asfálticas sem cápsulas, com seu aspecto final apresentado na Figura 36.

Figura 36. Corpo de prova com cápsulas.



Devido à baixa proporção de cápsulas adicionadas, não houve necessidade de ajustar as quantidades de agregados e ligante para compensar essa adição. Os corpos de prova compactados com cada teor de cápsulas foram submetidos a testes de parâmetros volumétricos para avaliar o impacto da incorporação das cápsulas em comparação com a mistura de referência. Os resultados indicaram valores médios de volume de vazios em torno de 3,9%, enquanto a mistura de referência apresentou 4%. Dessa forma, conclui-se que a adição das cápsulas não causou uma alteração significativa no volume de vazios da mistura, considerando a pequena diferença observada.

4.2.5 Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

Este tópico apresenta os procedimentos aplicados para análise das propriedades mecânicas e de desempenho das misturas asfálticas estudadas.

4.2.5.1 Resistência à tração por compressão diametral

A determinação da resistência à tração indireta de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas seguiu a norma DNIT 136/2018-ME. Este ensaio envolve a aplicação de uma carga compressiva ao longo do diâmetro do corpo de prova até sua ruptura, gerando tensões de tração perpendiculares à direção da carga aplicada. A resistência à tração é calculada com base na carga máxima registrada durante o ensaio.

O ensaio foi realizado utilizando uma prensa hidráulica Shimadzu (Figura 37), cuja interface do programa exibe a carga de ruptura do corpo de prova, permitindo uma medição precisa dos resultados.

Figura 37. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Para garantir resultados confiáveis, a norma recomenda que sejam testados três corpos de prova para cada tipo de mistura. A média dos valores obtidos nesses ensaios é usada para determinar a resistência à tração da mistura asfáltica avaliada.

A carga de ruptura medida durante o ensaio é convertida em resistência à tração (RT) utilizando a Equação 2:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH} \quad (2)$$

Onde:

σ_t : resistência à tração (MPa)

F : carga de ruptura (N)

D : diâmetro do corpo de prova (mm)

H : altura do corpo de prova (mm)

4.2.5.2 Dano por umidade induzida

O objetivo deste ensaio foi verificar a sensibilidade à água de misturas asfálticas compactadas, moldadas em laboratório. Seis corpos de prova foram preparados para cada tipo de mistura, garantindo um volume de vazios de $7 \pm 1\%$. Esses corpos de prova foram divididos em dois grupos: condicionado e não condicionado.

Para o grupo condicionado, os corpos de prova foram saturados em água com a aplicação de vácuo, seguidos por um processo de congelamento a $-18^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por no mínimo 16 horas. Depois do congelamento, foram aquecidos em um banho de água a $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 24 ± 1 horas, e em seguida ajustados a 25°C por 2 a 3 horas.

O grupo não condicionado foi diretamente ajustado à temperatura de 25°C . Após o condicionamento, ambos os grupos foram submetidos ao ensaio de resistência à tração (RT) na prensa hidráulica Shimadzu, onde a resistência à tração retida por umidade induzida (RRT) foi calculada como a razão entre a resistência das amostras condicionadas e não condicionadas.

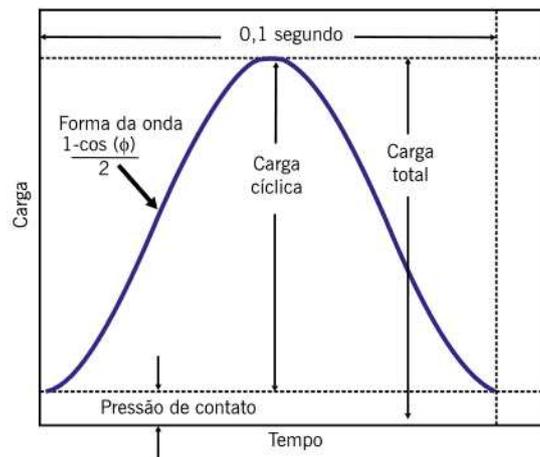
4.2.5.3 Módulo de resiliência

O módulo de resiliência é definido como a relação entre a tensão horizontal gerada pela carga repetitiva e a deformação horizontal recuperável após cada ciclo de carga, e é um parâmetro importante para avaliar o comportamento das misturas asfálticas sob carga cíclica. Esse módulo reflete a capacidade do material de retornar à sua forma original depois de ser submetido a deformações induzidas por tráfego repetido, e, por isso, é essencial para a análise da durabilidade e desempenho de pavimentos asfálticos.

O ensaio para determinar o módulo de resiliência de misturas asfálticas foi realizado utilizando um equipamento de compressão diametral, no qual uma carga pulsante, de forma de onda *haversine* (Figura 38), foi aplicada no plano diametral de um corpo de prova cilíndrico, utilizando a Universal Testing Machine (UTM-25), da IPC Global (Figura 39). A carga foi aplicada repetidamente, com o objetivo de gerar tensões

de tração transversais ao plano de aplicação. O deslocamento horizontal gerado pela tensão foi monitorado para calcular a deformação horizontal recuperável. O MR foi calculado utilizando os dados de tensão e deformação resiliente, que indica a rigidez do material e sua capacidade de recuperação após a carga. Além disso, o ensaio permitiu calcular o módulo instantâneo e o módulo total da mistura, além de possibilitar a determinação do coeficiente de Poisson, que é útil para caracterizar o comportamento elástico do material.

Figura 38. Forma de pulso de carregamento.



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2022).

Figura 39. Ensaio de módulo de resiliência.



Para garantir a precisão dos resultados, o corpo de prova foi submetido a um período de condicionamento à temperatura controlada, 25°C, e a uma pressão de contato. Durante o ensaio foram aplicados 50 ciclos de carga a uma força equivalente a 10% da resistência à tração (RT) da mistura, com uma frequência de 1 Hz. A aplicação de cada carga durou 0,10 segundos, seguida por um intervalo de repouso de 0,90 segundos, permitindo a recuperação total da deformação antes da aplicação da próxima carga. Esse ciclo repetido de carga e descarregamento permite que o comportamento resiliente do material seja avaliado de forma precisa e eficiente.

4.2.5.4 Resistência à deformação permanente

O procedimento para a determinação da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, regido pela Norma DNIT 184/2018 - ME, apresentou um fator essencial para a avaliação da durabilidade de pavimentos sob a ação de tráfego repetido. O ensaio foi realizado utilizando um equipamento de compressão uniaxial, neste caso, a máquina AMPT (Abrasive Mixture Performance Tester), que aplicou cargas repetidas no corpo de prova, simulando as condições de tráfego dinâmico e as tensões geradas nas camadas asfálticas. Esse método foi particularmente importante para avaliar a susceptibilidade das misturas à formação de trilhas, ou *rutting*, que pode comprometer a performance do pavimento ao longo do tempo.

O procedimento do ensaio consistiu na preparação de corpos de prova cilíndricos, que foram acondicionados em uma câmara de temperatura a 60°C para simular as condições de um pavimento aquecido pelo sol. A carga compressiva foi aplicada de forma pulsante, com uma frequência de 1 Hz, ou seja, a carga foi aplicada por 0,10 segundos, seguida por 0,90 segundos de repouso. Esse ciclo foi repetido até que a deformação acumulada atingisse um valor pré-determinado, momento em que o ensaio foi interrompido. Durante todo o processo, as deformações axiais foram monitoradas para calcular o número de ciclos de carga necessários até a formação da deformação permanente. Esse número, denominado *Flow Number*, foi um indicativo da resistência da mistura à deformação sob condições de tráfego.

4.2.5.5 Vida de fadiga

O ensaio de fadiga por compressão diametral, cuja finalidade foi avaliar a resistência das misturas asfálticas à formação de trincas geradas pela aplicação repetida

de cargas, foi realizado segundo a metodologia estabelecida pela norma DNIT 183/2018 - ME. Esse ensaio foi um indicador importante para a análise do comportamento das misturas asfálticas quando expostas a ciclos de carga, com o objetivo de simular as condições de tráfego em um pavimento ao longo do tempo.

Durante o ensaio, um corpo de prova cilíndrico foi submetido a uma carga compressiva pulsante, na UTM-25, por meio da aplicação de compressão diametral à tensão controlada, numa frequência de pulso de 1 Hz, sendo 0,1 s para a aplicação da carga senoidal e 0,9 s de repouso. Foram adotados 4 níveis de tensão, sendo eles 25%, 30%, 35% e 40% da resistência à tração da mistura.

A tensão de tração no centro do corpo de prova foi calculada com base na carga aplicada e nas dimensões do corpo de prova, sendo essa tensão responsável pela geração de trincas no material. A diferença entre as tensões de compressão e tração no centro do corpo de prova é representada por $\Delta\sigma$ (Equação 3):

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

Onde:

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

F = carga aplicada (N);

d = diâmetro do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm);

A deformação resiliente inicial no centro do corpo de prova foi determinada pela relação entre a tensão de tração e o módulo de resiliência (MR) da mistura asfáltica, o que fornece uma medida da resposta elástica do material à carga aplicada, segundo a Equação 4:

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

Onde:

ε_i = deformação resiliente específica;

RT = resistência à tração (MPa);

MR = módulo de resiliência (MPa);

Para avaliar a vida à fadiga da mistura asfáltica registrou-se o número de ciclos de carga (N) até a ruptura do corpo de prova (CP) em diferentes níveis de tensão. Com esses

dados, foram geradas curvas que relacionam os níveis de tensão aplicados ao número de ciclos de ruptura, ajustadas por uma função exponencial, resultando em um modelo preditivo de fadiga. Após a determinação dos valores de N , foram traçadas curvas relacionando esses valores à deformação de tração inicial (ε_i) e à diferença de tensões no centro do CP ($\Delta\sigma$), conforme o modelo de previsão de fadiga baseado nas curvas de Wöhler (Equações 5 e 6). O DNIT exige que as regressões lineares dessas curvas apresentem um coeficiente de determinação (R^2) mínimo de 0,8.

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{k_2} \quad (5)$$

$$N = k_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{k_4} \quad (6)$$

Onde:

N = número de aplicações de carga na ruptura;

k_1 ; k_2 ; k_3 e k_4 = parâmetros determinados no ensaio;

4.2.5.6 Módulo dinâmico

O módulo complexo E^* é uma grandeza que descreve o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, estabelecendo a relação entre a tensão e a deformação sob um carregamento senoidal aplicado em uma determinada frequência. O módulo dinâmico $|E^*|$, que corresponde ao valor absoluto de E^* , é obtido experimentalmente por meio da aplicação de carregamentos senoidais em diversas frequências e temperaturas, conforme estabelecido na norma DNIT 416/2019-ME.

Para a obtenção do módulo dinâmico e do ângulo de fase foram realizados ensaios em amostras cilíndricas de 150 mm de altura e 100 mm de diâmetro, seguindo as diretrizes da norma. Os ensaios foram conduzidos em frequências de carregamento de 25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz e 0,1 Hz, aplicadas sequencialmente da maior para a menor. Além disso, os testes foram realizados em três temperaturas distintas: 4°C, 20°C e 40°C. Durante a execução dos ensaios, cargas cíclicas do tipo *haversine* foram aplicadas e ajustadas para cada combinação de frequência e temperatura, de modo que as deformações se mantivessem dentro da faixa de 50 $\mu\epsilon$ a 75 $\mu\epsilon$.

Após a realização dos ensaios foram construídas curvas isotérmicas, representando graficamente o módulo dinâmico e o ângulo de fase em função das

frequências aplicadas para cada temperatura. Para a construção da curva mestra, essas curvas isotérmicas foram transladadas multiplicando-se as frequências por um fator denominado fator de deslocamento (*shift factor*, a_T), permitindo o melhor ajuste da curva mestra. As frequências transladadas obtidas são denominadas frequências reduzidas (f_R). A curva mestra pode ser ajustada por meio de um modelo sigmoidal, conforme apresentado na Equação 7, e os fatores de deslocamento podem ser descritos por uma função polinomial de segunda ordem, conforme a Equação 8.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(f_R)}} \quad (7)$$

$$\log(a_T) = a_1(T^2 - T_R^2) + a_2(T - T_R) + a_3 \quad (8)$$

Onde,

$|E^*|$ é o módulo dinâmico;

δ , α , β e γ são coeficientes de ajuste;

f_R é a frequência reduzida;

a_T é o fator de deslocamento;

T é a temperatura do ensaio (°C);

T_R é a temperatura de referência;

a_1 , a_2 e a_3 são os coeficientes de ajuste.

4.2.5.7 Ensaio de fadiga à tração direta uniaxial cíclico

As amostras utilizadas no ensaio de fadiga à tração foram preparadas utilizando o compactador giratório Superpave (CGS), com dimensões iniciais de 100x170mm (Figura 40a) e um volume de vazios de $5,5\% \pm 0,5\%$. Após a compactação, foram removidos aproximadamente 20mm das extremidades superior e inferior (Figura 40b), resultando em corpos de prova com dimensões finais de 100x130mm, em média (Figura 40c). A remoção das extremidades visou homogeneizar o volume de vazios nestas áreas, conforme o procedimento de Nascimento (2015), proporcionando também uma melhor distribuição das tensões durante a execução do ensaio.

Figura 40. Procedimento de remoção das extremidades dos corpos de prova.



Após o corte, os corpos de prova foram fixados nas placas superior e inferior (*endplates*) usando adesivo epóxi de baixa fluidez, com cura de 24 horas. Um gabarito foi utilizado para garantir o alinhamento correto das amostras, essencial para evitar tensões excêntricas. O processo está ilustrado na Figura 41.

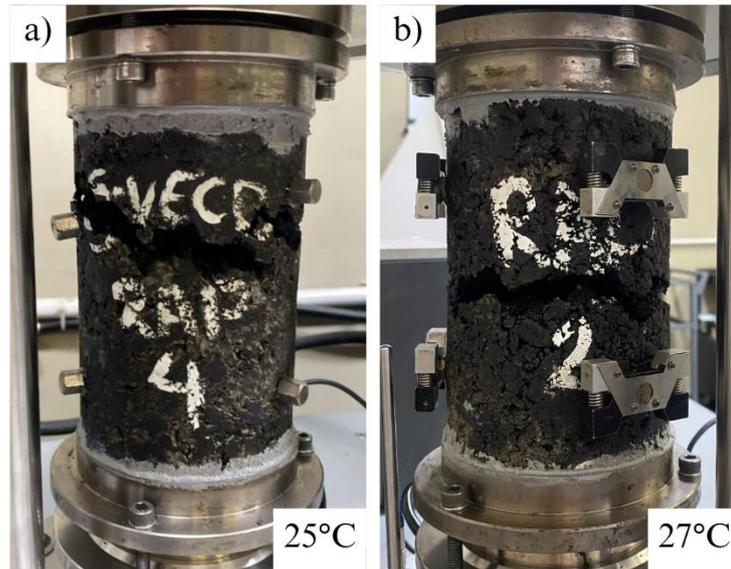
Figura 41. Fixação dos corpos de prova nas placas.



A realização do ensaio seguiu os procedimentos da norma AASHTO TP 107-14. No ensaio foi aplicada uma deformação cíclica senoidal ao corpo de prova, de amplitude constante e frequência de 10 Hz, utilizando a AMPT. De acordo com a norma, o ensaio deveria ser conduzido a temperatura máxima de 21°C, no entanto, ajustou-se a temperatura do ensaio para 25°C, devido a limitação da capacidade da célula de carga do equipamento, visando a realização do ensaio a uma menor rigidez. No entanto, nas misturas recicladas, a temperatura de ensaio foi ajustada para 27°C, para que o ensaio possa ser conduzido a tensões mais baixas, dada sua elevada rigidez. Esta adaptação da temperatura de ensaio foi necessária para garantir que a ruptura ocorresse no terço médio

do corpo de prova, uma vez que, a 25°C, a falha estava ocorrendo fora dessa região. A Figura 42 ilustra o padrão de rompimento dos corpos de prova testados a 25°C (a) e 27°C (b).

Figura 42. Ruptura dos CP's nas temperaturas de 25 e 27°C.



Os ensaios foram conduzidos sob diferentes condições de deformação, especificamente 130, 150 e 180 $\mu\epsilon$. A deformação axial foi monitorada por extensômetros, e durante o teste, foram coletados dados de módulo dinâmico, ângulo de fase, tensão, deslocamento do atuador, deformação e temperatura. O critério de ruptura foi determinado pela queda do ângulo de fase.

A primeira etapa do ensaio é a obtenção do *fingerprint*, por meio da aplicação de uma carga pequena, com deformações entre 50 e 75 $\mu\epsilon$, para determinar o módulo dinâmico nas mesmas condições do ensaio de fadiga (10 Hz e 25°C). Esta etapa tem como finalidade corrigir a variabilidade entre as amostras, ajustando a diferença de rigidez entre o módulo complexo e as amostras para o ensaio de fadiga. Com os dados obtidos, calcula-se o *Dynamic Modulus Ratio* (DMR). Após 20 minutos, as amostras são submetidas ao ensaio de fadiga, onde o atuador é programado para alcançar um deslocamento de pico constante por ciclo de carga.

A deformação do atuador foi calculada dividindo o deslocamento do atuador pela altura da amostra (130 mm), enquanto a deformação do corpo de prova foi determinada pela razão entre o deslocamento medido pelos LVDTs acoplados e o comprimento entre os sensores (70 mm). Embora a deformação do atuador permaneça em tração durante o ensaio, a resposta de tensão inclui ciclos de tração e compressão devido à natureza viscoelástica do material.

4.2.6 Medida da regeneração

4.2.6.1 Aplicação do modelo simplificado viscoelástico de dano contínuo (S-VECD)

No estudo realizado por Underwood *et al.* (2012) foi apresentada a formulação final do modelo Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD), demonstrando sua aplicação na modelagem do comportamento à fadiga de misturas asfálticas. Esse modelo traz uma abordagem simplificada para prever a degradação do material sob carregamentos cíclicos, combinando princípios da viscoelasticidade com a teoria do dano contínuo. Dessa forma, é possível descrever com maior precisão a evolução do dano ao longo do tempo. A seguir, serão apresentadas as equações fundamentais da formulação, acompanhadas de explicações detalhadas sobre sua relevância e aplicação na análise de fadiga.

i. Pseudo-deformação

A pseudo-deformação ε^R foi determinada com base no módulo de relaxação elástico-viscoelástico (LVE) e na resposta em tensão do material ao longo do tempo reduzido. Essa grandeza é fundamental para a caracterização do dano, permitindo a quantificação da degradação estrutural do material ao longo dos ciclos de carregamento, sendo definido pela integral apresentada na Equação 9:

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^\xi E(\xi - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (9)$$

Onde:

E_R é um módulo de referência arbitrário para normalização;

$E(\xi)$ é o módulo de relaxação do material;

τ é uma variável de integração relacionada ao tempo reduzido;

ε é a deformação do material.

No regime cíclico, essa deformação pode ser associada à amplitude da pseudo-deformação $\varepsilon_{0,ta}^R$, que depende do fator de forma β e do módulo dinâmico $|E^*|_{LVE}$.

Expressa pela Equação 10:

$$\varepsilon_{0,ta}^R = \frac{1}{E_R} * \frac{\beta + 1}{2} * (\varepsilon_{0,pp}) * |E^*|_{LVE} \quad (10)$$

Onde:

$\varepsilon_{0,ta}^R$ é a amplitude de deformação pico a pico;

$|E^*|_{LVE}$ é o módulo dinâmico viscoelástico linear;

β é o fator de forma.

O fator de forma β é utilizado para quantificar a assimetria do carregamento aplicado e é definido pela Equação 11:

$$\beta = \frac{\sigma_{pico} + \sigma_{vale}}{|\sigma_{pico}| + |\sigma_{vale}|} \quad (11)$$

Onde:

σ_{pico} é o valor máximo da tensão no ciclo avaliado;

σ_{vale} é o valor mínimo da tensão no ciclo avaliado.

Já o tempo reduzido ξ é calculado pela Equação 12:

$$\xi = \frac{t}{a_T} \quad (12)$$

Onde a_T é o fator de deslocamento devido à temperatura.

ii. Pseudo-rigidez

A pseudo-rigidez C foi obtida a partir da razão entre a tensão aplicada e a pseudo-deformação correspondente, na Equação 13:

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R} * DMR \quad (13)$$

Onde:

σ é a tensão aplicada;

DMR é a razão do módulo dinâmico.

No contexto cíclico, a pseudo-rigidez C^* é definida como função da amplitude de tensão pico a pico $\sigma_{0,pp}$ e da amplitude da pseudo-deformação $\varepsilon_{0,ta}^R$, modulada pelo parâmetro DMR , que representa a razão do módulo dinâmico, expressos na Equação 14:

$$C^* = \frac{\sigma_{0,pp}}{\varepsilon_{0,ta}^R} * DMR \quad (14)$$

O parâmetro DMR representa a razão do módulo dinâmico e é expresso como:

$$DMR = \frac{|E^*|_{fingerprint}}{|E^*|_{LVE}} \quad (15)$$

iii. Função de Crescimento do Dano

A evolução do dano foi descrita por meio de uma função que relaciona a variação da pseudo-rigidez ao longo dos ciclos de carregamento. Essa função pode ser dividida em duas fases: dano transiente e dano cíclico.

O dano transiente ocorre no início do carregamento, e expresso pela Equação 16:

$$dS_{transiente} = \left[-\frac{DMR}{2} (\varepsilon^R)^2 (\Delta C_i) \right]^{1+\alpha} * [\Delta \xi]^{1+\alpha} \quad (16)$$

Enquanto o dano cíclico é calculado ao longo dos ciclos por meio da Equação 17:

$$dS_{ciclo} = \left[-\frac{DMR}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 (\Delta C_i) \right]^{1+\alpha} * [\Delta N_i * \xi_p * K_1]^{1+\alpha} \quad (17)$$

Onde:

ΔC_i é a variação da pseudo-rigidez entre ciclos consecutivos;

ΔN_i é a variação

ξ_p é o tempo reduzido de carga;

K_1 é o fator de ajuste.

A taxa de evolução do dano α é determinada segundo a Equação 18:

$$\alpha = \frac{1}{m + 1} \quad (18)$$

Onde m é a inclinação do máxima do módulo de relaxação $E(t)$ versus t na escala log-log.

iv. Termos Adicionais da Equação

O fator de ajuste K_1 foi empregado para considerar as influências do histórico de carregamento e da transição entre os regimes de dano, e foi calculado pela Equação 19:

$$K_1 = \frac{1}{\xi_f - \xi_i} \int_{\xi_i}^{\xi_f} (\beta - \cos(2\pi f \xi))^{2\alpha} d\xi \quad (19)$$

Os tempos reduzidos de início (ξ_i) e fim (ξ_f) de dano são determinados pelas Equações 20 e 21:

$$\xi_i = \frac{\cos^{-1}(\beta)}{2\pi f} \quad (20)$$

$$\xi_f = \frac{1}{f} - \frac{\cos^{-1}(\beta)}{2\pi f} \quad (21)$$

Em conjunto aos resultados obtidos no ensaio de módulo dinâmico descrito anteriormente, ajustados por meio de um modelo sigmoidal, o modelo Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD) permitiu a construção das curvas características de dano, conhecidas como curvas C x S . Essas curvas representam a

relação entre a integridade do material (pseudo-rigidez, C) e a extensão do dano acumulado (S). Essa relação é única para um material específico, permanecendo inalterada independentemente das condições de carregamento, temperatura, taxa de aplicação de carga ou amplitude do esforço aplicado.

As curvas $C \times S$ foram ajustadas utilizando um modelo de potência, conforme Equação 22, onde C_{11} e C_{12} representam os coeficientes determinados por meio de regressão. Esses coeficientes são fundamentais para descrever o comportamento de dano do material, permitindo previsões precisas sobre sua durabilidade e resistência sob diferentes condições operacionais.

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (22)$$

A análise da vida útil sob fadiga foi conduzida utilizando dois critérios de falha: o G^R e o D^R . O critério G^R , introduzido por (SABOURI; KIM, 2014), refere-se à taxa média de liberação de energia de pseudo-deformação por ciclo de teste, calculada conforme a Equação 23:

$$G^R = \frac{W_C^R}{Nf} = \frac{\int_0^{Nf} W_C^R}{(Nf)^2} \quad (23)$$

Onde:

W_C^R é a pseudo-energia de deformação liberada por ciclo.

As envoltórias de ruptura G^R vs N_f foram ajustadas ao modelo de potência representados pela Equação 24:

$$G^R = Y * N_f^\Delta \quad (24)$$

Onde:

Y e Δ são os coeficientes de regressão.

O critério D^R , desenvolvido por Wang e Kim (2019), avalia a redução da pseudo-rigidez do material ao longo do tempo, fornecendo uma medida adicional da progressão do dano por fadiga (WANG; KIM, 2019), e é calculado pela Equação 25:

$$D^R = \frac{\int_0^{Nf} (1 - C)dN}{Nf} \quad (25)$$

Um valor mais elevado de D^R indica uma maior propensão da mistura ao acúmulo de danos ao longo do ensaio, refletindo sua capacidade de dissipar energia antes da falha. Esse comportamento pode estar relacionado à resistência do material à degradação progressiva, influenciando diretamente sua durabilidade sob solicitações cíclicas.

O parâmetro S_{app} , desenvolvido por Wang, Underwood e Kim (2022), foi utilizado para avaliar a resistência de materiais aos danos por fadiga. O S_{app} considera a rigidez e a tenacidade do material, sendo calculado conforme a Equação 26.

$$S_{app} = \frac{1}{100} \frac{\alpha_T^{\frac{1}{\alpha+1}} \left(\frac{D^R}{C_{11}} \right)^{\frac{1}{C_{12}}}}{\left(\frac{|E^*|}{10^6} \right)^{\frac{\alpha}{4}}} \quad (26)$$

Valores mais elevados de S_{app} indicam uma maior capacidade do material em resistir à fadiga. Além disso, os autores estabeleceram valores de referência para o S_{app} de acordo com diferentes níveis de tráfego, conforme a Tabela 14. Os valores de referência indicam que o valor de S_{app} da mistura asfáltica deve ser superior a 8 para ser considerado adequado em uma condição de tráfego padrão.

Tabela 14. Valores limites recomendados para o parâmetro S_{app} à diferentes níveis de tráfego.

Tráfego (milhões de eixo-padrão)	Limites S_{app}	Nível do tráfego
Inferior a 10	$S_{app} > 8$	Padrão
Entre 10 e 30	$S_{app} > 24$	Pesado
Acima de 30	$S_{app} > 30$	Muito pesado
Acima de 30 e baixa velocidade	$S_{app} > 36$	Extremamente pesado

Fonte: Adaptado de Wang, Underwood e Kim (2022).

4.2.6.2 Protocolo healing

Para avaliação da regeneração das misturas asfálticas estudadas foi utilizada uma adaptação do ensaio de fadiga uniaxial à tração direta, proposto por Nascimento (2015). Essa modificação incorporou períodos de repouso programados durante a aplicação do carregamento cíclico, permitindo a avaliação da capacidade de regeneração do material. A introdução desses intervalos foi baseada na redução da rigidez do material, sendo monitorada em tempo real para garantir a inserção dos períodos de repouso nos momentos mais adequados.

O critério para definição dos períodos de repouso seguiu um controle baseado na integridade do material, verificada a partir do módulo complexo, sendo aplicados intervalos quando os seguintes níveis foram atingidos: 0,9, 0,8, 0,7, 0,6, 0,5, 0,4, 0,3, 0,2

e 0,1, ou seja, verificado a partir da defasagem do módulo de 10 em 10%. A rigidez inicial da mistura foi determinada previamente em um ensaio na mesma temperatura, utilizando um carregamento cíclico de 10 Hz com deformação controlada de 60 *microstrain*, baixa o suficiente para que não haja dano.

A pesquisa conduzida por Pivetta *et al.* (2020) utilizou a relação entre tempo e temperatura em materiais viscoelásticos, seguindo o princípio da superposição tempo-temperatura, que estabelece que variações de temperatura podem ser compensadas por ajustes no tempo de repouso. Os resultados dos autores demonstraram que a temperatura e o tempo de repouso influenciam diretamente na regeneração das misturas asfálticas. O autor destaca que os períodos de repouso aplicados durante o ensaio, de 10s, 30s e 270s, não representam situações realísticas, em que cada ciclo é sucedido por um período de repouso, ou seja, em condições de serviço em que os períodos estão presentes em maior número, os efeitos da regeneração são ainda mais relevantes. O estudo identificou que um período de repouso de 270 segundos a 30°C proporcionou a maior recuperação da integridade do material, ou seja, a aplicação nesse período de repouso (PR) foi a que permitiu avaliar, de maneira mais eficaz, o efeito da regeneração.

Com base nesse princípio, os intervalos de repouso foram determinados por meio da definição de períodos de repouso reduzidos, ou seja, valores ajustados para permitir comparações diretas entre diferentes temperaturas. Além disso, para garantir uma transição suave entre os diferentes níveis de temperatura, alguns valores foram sobrepostos, permitindo que a análise contemplasse variações nas taxas de recuperação das misturas asfálticas sob diferentes condições térmicas.

Dessa forma, os valores escolhidos garantiram que o protocolo experimental fosse abrangente e adequado para diferentes composições de misturas asfálticas, mesmo diante de variações nos fatores de mudança específicos de cada material, tendo como referência o PR de 270 segundos para uma temperatura de 30°C, conforme citado anteriormente. Esses valores foram posteriormente ajustados por meio do cálculo do período de repouso reduzido (PR reduzido), utilizando o princípio da superposição tempo-temperatura, que permite projetar o tempo físico de repouso para as características viscoelásticas do material sob determinada temperatura. Para isso, foi aplicada a equação 27:

$$\xi = \int_0^t \frac{1}{a_T} dt \quad (27)$$

Onde:

ξ é o tempo reduzido (s);

t representa o tempo físico (s)

a_T é o shift fator, que corrige a influência da temperatura e das propriedades do material.

O cálculo do PR reduzido foi simplificado pela relação direta entre o tempo físico (t) e o shift fator (a_T), conforme a equação 28:

$$\xi = \frac{t}{a_T} \quad (28)$$

Assim, para cada mistura estudada, o período de repouso real foi ajustado de acordo com o seu respectivo *shift factor*, projetando-o para uma escala comparável entre diferentes temperaturas e materiais. Os valores obtidos para cada mistura estão detalhados na Tabela 15.

Tabela 15. Períodos de repouso reduzidos para as condições de cada mistura estudada.

Mistura	Temperatura	Shift-factor	PR reduzido (s)
REF	25°C	0,23	1174
RAP	27°C	0,16	1687
R-C-1	27°C	0,15	1800
R-C-2	27°C	0,16	1687

A adaptação do protocolo seguiu a formulação do modelo Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD), que possibilita a quantificação da degradação e recuperação do material por meio da curva característica de dano ($C \times S$). Esse modelo tem se mostrado eficaz para prever o comportamento à fadiga de misturas asfálticas e, quando associado à análise de períodos de repouso, fornece uma visão abrangente sobre os mecanismos de regeneração do material.

Para mensurar a regeneração, o modelo incorporou uma variável de estado de regeneração, desenvolvida por Ashouri (2014), que sintetiza os efeitos combinados do tempo de repouso, temperatura e nível de dano em um único parâmetro. Essa variável foi integrada ao modelo matemático de previsão do índice de regeneração ($\%H_S$), permitindo uma avaliação quantitativa do potencial de recuperação da mistura, e é calculada a partir da Equação 29:

$$\%H_S = \frac{\Delta S_{H_i}}{S_{C_i}} * 100 \quad (29)$$

Onde:

$\%H_S$ é o índice de regeneração;

ΔS_{H_i} é a variação de dano entre pontos de mesma integridade;

S_{C_i} é o dano na integridade de repouso;

A partir dos dados obtidos no ensaio de fadiga a tração direta e tratados por meio do modelo S-VECD, foi possível aplicar esta equação para mensurar a regeneração das misturas estudadas por meio da recuperação no acúmulo de danos (Parâmetro S) para um mesmo nível de integridade após cada período de repouso.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

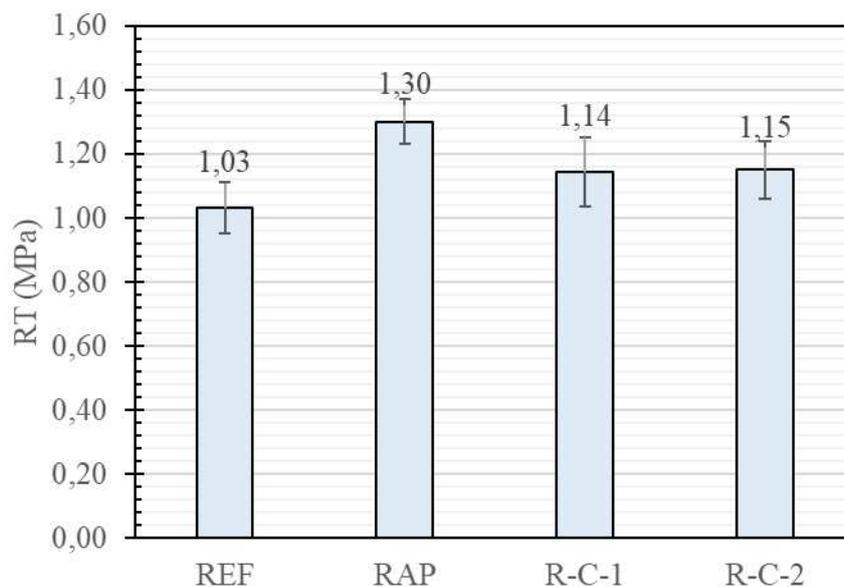
Este capítulo apresenta e discute os resultados da pesquisa, analisando as propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas com agentes rejuvenescedores encapsulados. São avaliados ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, dano por umidade induzida, deformação permanente e vida de fadiga, além da capacidade de regeneração do dano pelo modelo S-VECD. A influência do teor de óleo nas cápsulas e seu impacto na recuperação estrutural das misturas também são discutidos.

5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

5.1.1 Resistência à tração

A Figura 43 mostra os valores médios de resistência à tração por compressão diametral (RT) dos quatro grupos de misturas asfálticas estudados, juntamente com os desvios-padrão correspondentes.

Figura 43. Resistência à tração das misturas asfálticas estudadas.



Os resultados da Análise de Variância (ANOVA) entre as misturas R-C-1 e R-C-2 apresentaram um valor de F-statistic de 0.0065 e um p-value de 0.9398. Com base no p-value, que é significativamente maior que o nível de significância usual de 5% ($p > 0.05$), concluímos que não há evidências estatísticas suficientes para rejeitar a hipótese nula de que as médias das resistências à tração das duas misturas são iguais. Ou seja, as diferenças observadas nas médias das amostras R-C-1 e R-C-2 não são estatisticamente significativas, indicando que ambas as misturas apresentam comportamentos semelhantes

em termos de resistência à tração. Esses resultados sugerem que, do ponto de vista estatístico, a alteração na quantidade de óleo entre as misturas R-C-1 e R-C-2 não impactam de maneira relevante no que se refere à resistência à tração.

A análise estatística foi expandida para incluir todas as amostras (REF, RAP, R-C-1 e R-C-2). A ANOVA geral revelou um valor de F-statistic de 4.6401 e um p-value de 0.0367, indicando que existem diferenças estatisticamente significativas entre pelo menos duas das amostras analisadas ($p < 0.05$).

A Tabela 16 apresenta os resultados da ANOVA para as comparações realizadas, incluindo os valores de F-statistic, p-value e a indicação da presença ou não de diferença estatisticamente significativa.

Tabela 16. Resultado da análise estatística (ANOVA) para os valores de resistência à tração das misturas estudadas.

COMPARAÇÃO	<i>F-statistic</i>	<i>p-value</i>	DIFERENÇA SIGNIFICATIVA
Todas as Amostras	4.6401	0.0367	Sim
REF vs RAP	18.7821	0.0123	Sim
REF vs R-C-1	2.0352	0.2269	Não
REF vs R-C-2	2.8609	0.1660	Não
RAP vs R-C-1	4.3969	0.1040	Não
R-C-1 vs R-C-2	0.0065	0.9398	Não

A ausência de diferenças estatisticamente significativas entre as misturas contendo cápsulas (R-C-1 e R-C-2) e tanto a mistura de referência (REF) quanto a mistura com RAP (RAP), em contraste com a diferença significativa observada entre REF e RAP, sugere um efeito moderador da adição das cápsulas nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Esse comportamento indica que as cápsulas podem atuar mitigando o aumento de rigidez promovido pelo RAP e promovendo uma resposta mecânica mais próxima àquela observada na mistura de referência. Assim, a presença das cápsulas contribui para uma maior homogeneidade no desempenho das misturas, sugerindo um potencial para otimizar a combinação de rigidez e flexibilidade, características essenciais para a durabilidade e a resistência à tração em pavimentos asfálticos.

Como esperado, as misturas contendo RAP apresentaram maior resistência à tração, devido à presença de material envelhecido e, conseqüentemente, mais rígido. Observou-se que a incorporação das cápsulas resultou em uma redução na resistência à tração das misturas, demonstrando a capacidade de reduzir a rigidez introduzida pelo RAP. Embora o óleo esteja encapsulado, essa redução na resistência à tração pode ser atribuída à liberação de óleo no entorno das cápsulas durante os processos de usinagem e

compactação, conforme constatado por Micaelo *et al.* (2016) e confirmado por Barros (2020).

Costa *et al.* (2023) investigaram misturas asfálticas recicladas modificadas com zeólita e óleo de algodão, avaliando diferentes teores de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) para otimizar o desempenho mecânico e os impactos na economia circular. Em relação à resistência à tração, os resultados indicaram que a adição de óleo de algodão reduziu a resistência à tração em comparação com a mistura controle. Especificamente, a resistência das misturas com 4% e 6% de óleo de algodão – e 15% e 25% de RAP, respectivamente - caiu 27,08% e 31,25%, respectivamente. Entretanto, a mistura com 10% de óleo de algodão e 33% de RAP manteve um desempenho similar ao da mistura controle, sugerindo que o maior teor de RAP pode ter influenciado positivamente a resistência mecânica.

Barros *et al.* (2022) estudaram o impacto da adição de cápsulas contendo óleo de soja e óleo de cozinha residual em misturas asfálticas, analisando seus efeitos nas propriedades mecânicas e na capacidade de regeneração do material. Em relação à resistência à tração das misturas estudadas, os resultados indicaram que a incorporação dessas cápsulas reduziu a resistência à tração indireta. Especificamente, as misturas com cápsulas de óleo de soja apresentaram redução de 7,2%, enquanto as cápsulas contendo óleo de cozinha residual resultaram em uma redução de 11,1%. Já as misturas com cápsulas contendo maior teor de óleo de soja tiveram a maior redução, chegando a 12,1%.

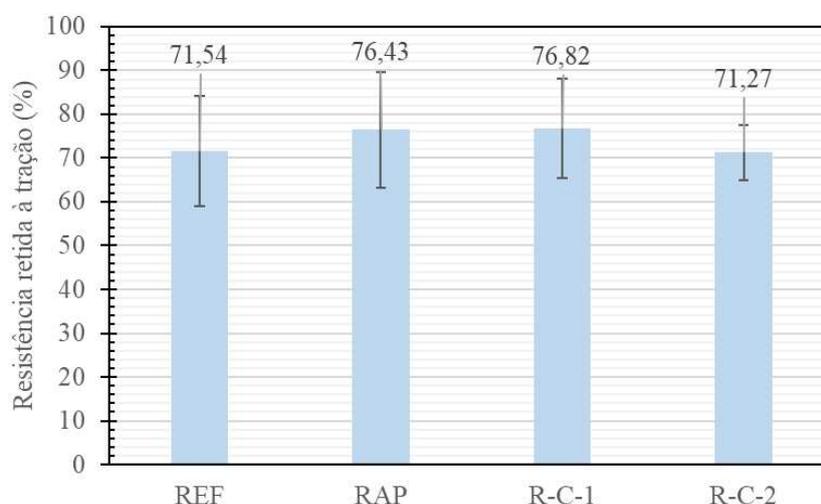
Em relação à resistência à tração das misturas estudadas, os resultados indicaram que a adição das cápsulas resultou em uma redução significativa nos valores medidos. As misturas com cápsulas apresentaram uma diminuição na resistência à tração entre 15% e 25%, dependendo da composição utilizada. A menor resistência foi atribuída à maior deformabilidade das cápsulas em comparação com os agregados minerais convencionais, além da possibilidade de liberação prematura do rejuvenescedor durante a usinagem e compactação, o que pode afetar a coesão da mistura.

5.1.2 Dano por umidade induzida

A análise dos resultados de dano por umidade induzida, apresentados na Figura 44, revela os valores médios da resistência à tração retida (RRT) das misturas asfálticas investigadas, juntamente com seus desvios-padrão. Esses dados foram obtidos em

conformidade com os requisitos da especificação de serviço DNIT 031/2006, que estabelece uma RRT mínima de 70% para misturas asfálticas.

Figura 44. RRT das misturas asfálticas estudadas.



O teste t realizado com nível de significância de 5% demonstrou que a diferença entre a RRT da mistura sem cápsulas e as misturas com cápsulas Tipo 1 (R-C-1) e Tipo 2 (R-C-2) é estatisticamente insignificante, já que os p-valores foram 0.6185 e 0.9752, respectivamente. Da mesma forma, a diferença em relação à mistura RAP também não foi significativa ($p = 0.6657$). Essas conclusões indicam que as cápsulas, tanto do Tipo 1 quanto do Tipo 2, não afetam substancialmente a resistência à susceptibilidade a umidade das misturas em comparação com a mistura sem cápsulas, nem com a mistura RAP.

Os resultados do teste t, realizado com nível de significância de 5%, demonstraram que não há diferenças estatisticamente significativas entre a RRT das misturas analisadas. Esses resultados indicam que a adição das cápsulas, tanto do Tipo 1 quanto do Tipo 2, não afeta substancialmente a susceptibilidade a umidade das misturas, quando comparadas à mistura de referência ou à mistura com RAP. Esse comportamento sugere que as cápsulas não comprometem a adesividade das misturas asfálticas, mantendo um desempenho consistente mesmo com a presença de RAP.

A Tabela 17 apresenta os resultados do teste t para as comparações realizadas, incluindo os valores de t-statistic, p-value e a indicação da presença ou não de diferença estatisticamente significativa.

Tabela 17. Resultados do teste t para o ensaio de RT.

COMPARAÇÃO	<i>t-statistic</i>	<i>p-value</i>	DIFERENÇA SIGNIFICATIVA
REF vs R-C-1	-0.5387	0.6189	Não
REF vs R-C-2	0.0343	0.9748	Não
REF vs RAP	-0.4655	0.6658	Não
RAP vs R-C-1	-0.0386	0.9711	Não
RAP vs R-C-2	0.6142	0.5840	Não
R-C-1 vs R-C-2	-0.6142	0.5840	Não

A ausência de diferenças significativas entre as misturas sugere que as propriedades de resistência a ação deletéria da água são mantidas independentemente da adição de RAP ou cápsulas.

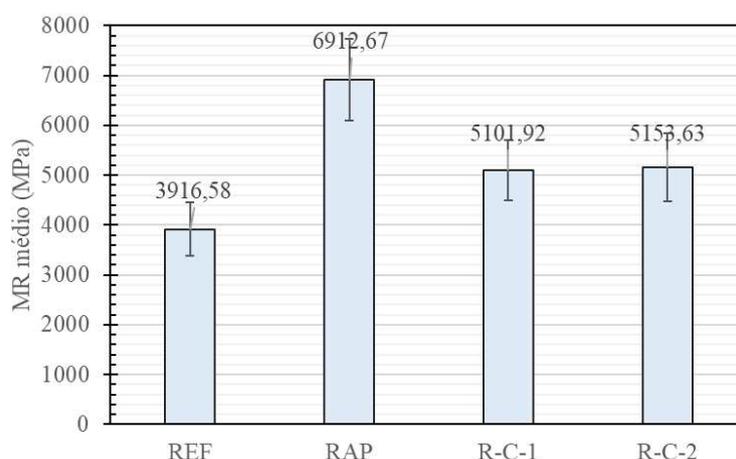
Silva *et al.* (2024) investigaram o efeito da incorporação de cápsulas em misturas asfálticas, analisando seu impacto nas propriedades mecânicas. As cápsulas utilizadas foram confeccionadas com borra de soja e ácido graxo da borra de soja. No ensaio de dano por umidade induzida, a inclusão de cápsulas do tipo C/BS0,1 (borra de soja com relação rejuvenescedor/água de 0,1), C/AGS0,1 (ácido graxo da borra de soja com relação rejuvenescedor/água de 0,1) e C/AGS0,2 (ácido graxo da borra de soja com relação rejuvenescedor/água de 0,2) promoveu uma melhoria na resistência à tração retida de 10,39%, 10,59% e 8,40%, respectivamente, indicando uma menor susceptibilidade ao dano por umidade. Por outro lado, as misturas contendo cápsulas C/BS0,2 (borra de soja com relação rejuvenescedor/água de 0,2) apresentaram uma redução de 3,87% na resistência à umidade, o que pode estar associado à dificuldade de adequação estrutural dessas cápsulas dentro da matriz asfáltica. O maior diâmetro dessas cápsulas, aliado a um menor número de giros na compactação, pode ter resultado em um aumento dos vazios internos na interface com a cápsula, favorecendo a infiltração de água.

Os achados de Silva *et al.* (2024) demonstram que a adição de cápsulas encapsuladas pode melhorar a resistência à umidade das misturas asfálticas, dependendo da sua composição e proporção na mistura. Essa tendência é compatível com os resultados obtidos, onde variações na resistência à tração retida também foram observadas entre as diferentes composições testadas. A correlação entre os estudos sugere que a incorporação de rejuvenescedores encapsulados pode influenciar significativamente a durabilidade das misturas.

5.1.3 Módulo de resiliência

A Figura 45 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de resiliência nas misturas estudadas, assim como seus respectivos desvio-padrão.

Figura 45. Módulo de resiliência das misturas asfálticas estudadas.



A Análise de Variância (ANOVA) realizada entre as amostras R-C-1 e R-C-2 indicou que não há diferenças estatisticamente significativas entre as médias dessas amostras. A estatística F foi de 0,032, com um valor p de 0,860. Dado o nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$), o valor p obtido é muito maior que 0,05, o que sugere que não podemos rejeitar a hipótese nula de igualdade das médias. Assim, os resultados indicam que as amostras R-C-1 e R-C-2 apresentam propriedades mecânicas similares, sem diferenças significativas entre elas.

Os resultados do teste t, realizado com nível de significância de 5%, demonstraram que há diferenças estatisticamente significativas entre o Módulo de Resiliência (MR) das misturas analisadas. As comparações entre a mistura de referência (REF) e as misturas com cápsulas Tipo 1 (R-C-1) e Tipo 2 (R-C-2) indicaram a existência de diferenças estatisticamente significativas. De forma semelhante, a comparação entre a mistura REF e a mistura com RAP também apresentou diferença significativa. Além disso, as comparações entre RAP e R-C-1, e RAP e R-C-2 também revelaram diferenças significativas. Apenas a comparação entre R-C-1 e R-C-2 não apresentou diferença estatisticamente significativa.

Esses resultados indicam que a adição das cápsulas, tanto do Tipo 1 quanto do Tipo 2, afeta substancialmente o MR das misturas, quando comparadas à mistura de referência e à mistura com RAP. Esse comportamento sugere que as cápsulas têm um

impacto significativo na estabilidade mecânica das misturas asfálticas, contribuindo para modificações relevantes nas propriedades mecânicas.

A Tabela 18 apresenta os resultados do teste t para as comparações realizadas, incluindo os valores de t-statistic, p-value e a indicação da presença ou não de diferença estatisticamente significativa.

Tabela 18. Resultados do teste t para o ensaio de MR.

COMPARAÇÃO	t-statistic	p-value	DIFERENÇA SIGNIFICATIVA
REF vs RAP	-10.6203	1.80E-09	Sim
REF vs R-C-1	-5.0734	4.55E-05	Sim
REF vs R-C-2	-4.2870	9.39E-04	Sim
RAP vs R-C-1	6.2041	4.38E-06	Sim
RAP vs R-C-2	5.2130	7.23E-05	Sim
R-C-1 vs R-C-2	-0.5301	0.6043	Não

A análise dos resultados do Módulo de Resiliência (MR) apresentou diferenças estatisticamente significativas entre a mistura com RAP e as misturas contendo cápsulas (R-C-1 e R-C-2), indicando que a incorporação das cápsulas afeta significativamente as propriedades mecânicas das misturas. Esses resultados reforçam a eficácia das cápsulas na modificação das características da mistura, contribuindo para alterações relevantes no desempenho mecânico.

Além disso, mesmo a mistura R-C-2 contendo maior teor de óleo encapsulado, seu valor de MR é semelhante ao da mistura R-C-1. Esse comportamento pode ser explicado pela retenção do óleo dentro da matriz polimérica das cápsulas Tipo 2, conforme discutido no tópico 654.2.1.2. Isso sugere que a quantidade adicional de óleo presente nas cápsulas não está totalmente disponível para interagir com o ligante asfáltico, o que limita seu efeito como agente rejuvenescedor e resulta em valores de MR semelhantes para as misturas R-C-1 e R-C-2.

Os resultados obtidos no estudo de Costa *et al.* (2023) corroboram com os achados do presente estudo, no qual a adição de microcápsulas de óleo de algodão também resultou em uma redução no módulo de resiliência (MR) das misturas asfálticas. No estudo deste autor, as misturas recicladas contendo RAP (15%, 25% e 33%) e óleo de algodão (4%, 6% e 10%) apresentaram um comportamento semelhante: para 15% e 25% de RAP, o MR reduziu em 13% com a adição de 4% e 6% de óleo de algodão, evidenciando o efeito rejuvenescedor do óleo ao suavizar a rigidez da mistura. No entanto, para 33% de RAP e 10% de óleo de algodão, observou-se um aumento de 15% no MR,

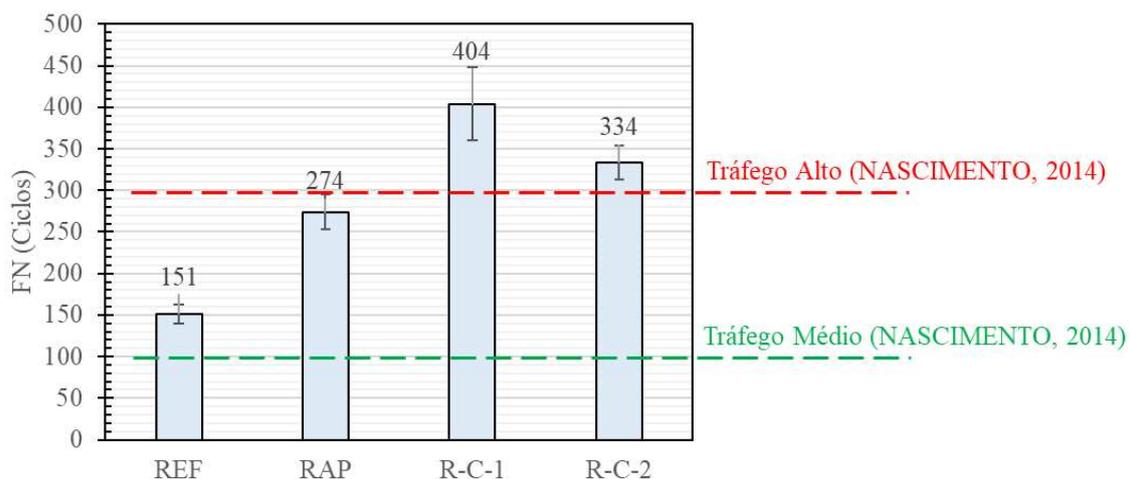
indicando que, a partir desse ponto, o endurecimento do RAP tornou-se dominante e o óleo já não conseguiu reverter completamente os efeitos do ligante envelhecido.

O estudo de Barros *et al.* (2022) demonstrou que a incorporação de cápsulas de óleo reduziu o módulo de resiliência (MR) das misturas asfálticas, com quedas de 30,0%, 25,7% e 36,1% para cápsulas de óleo de soja (SB1), óleo de cozinha residual (WCO) e cápsulas com maior teor de óleo de soja (SB2), respectivamente. Esses achados corroboram com os resultados do presente estudo.

5.1.4 Resistência à deformação permanente

A Figura 46 apresenta os resultados obtidos para a resistência a deformação permanente (Flow Number – FN) para as misturas asfálticas estudadas.

Figura 46. *Flow Number* das misturas asfálticas estudadas.



Foi realizada uma ANOVA para avaliar o impacto das cápsulas e do RAP na resistência à deformação permanente (FN) das misturas. A ANOVA revelou diferenças significativas entre os grupos ($F = 43,44$; $p = 0,00007$), indicando que pelo menos uma das misturas apresenta comportamento diferente em termos de resistência.

Após a ANOVA, foi realizado um Teste de Comparações Múltiplas de Tukey, visando identificar quais grupos diferem entre si. Conforme apresentado na Tabela 19, observa-se que a adição de RAP resultou em um aumento significativo na resistência à deformação permanente em relação à mistura de referência (REF). A formulação com cápsulas do tipo R-C-1 apresentou o maior ganho de resistência entre todas as misturas analisadas, enquanto a mistura R-C-2, embora tenha apresentado melhora em relação à

REF, não demonstrou diferença significativa em comparação com a mistura contendo RAP.

O critério adotado para considerar uma diferença como estatisticamente significativa foi o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Assim, diferenças com valores de p (p-value) inferiores a 0,05 foram consideradas significativas, indicando que há evidências estatísticas suficientes para rejeitar a hipótese nula de igualdade entre as médias comparadas, revelando que houve diferença significativa nos resultados apresentados. Valores de p superiores a 0,05 foram interpretados como não significativos.

Tabela 19. Resultados do teste de Tukey para os dados de FN das misturas estudadas

COMPARAÇÃO	DIFERENÇA DE MÉDIAS (CICLOS)	p-value	DIFERENÇA SIGNIFICATIVA
REF vs RAP	123,67	0,0042	Sim
REF vs R-C-1	253,00	<0,0001	Sim
REF vs R-C-2	183,50	0,0008	Sim
RAP vs R-C-1	129,33	0,0032	Sim
RAP vs R-C-2	59,83	0,1758	Não
R-C-1 vs R-C-2	69,50	0,3180	Não

Esses resultados sugerem que o RAP melhora a resistência à deformação permanente e que as cápsulas podem potencializar esse efeito, especialmente em R-C-1. A eficácia das cápsulas parece depender de sua composição e teor de óleo, sendo observada melhor performance nas cápsulas com menor quantidade de óleo.

As misturas asfálticas com cápsulas atingiram o valor mínimo de resistência à deformação permanente (FN) recomendado para tráfego alto (300 ciclos), conforme indicado por Nascimento (2014). Isso demonstra que a adição de cápsulas contribuiu para melhorar as propriedades das misturas, possibilitando que atingissem o desempenho esperado para essa faixa de tráfego. Por outro lado, as misturas sem cápsulas não alcançaram esse valor mínimo, situando-se em faixas de tráfego de nível menor, evidenciando o impacto positivo das cápsulas no aumento da resistência à deformação permanente e utilização em maiores solicitações de tráfego.

O estudo de Melo Neto (2022) avaliou a resistência à deformação permanente (Flow Number - FN) em misturas asfálticas recicladas com adição de 40% de RAP e do agente rejuvenescedor ácido graxo da borra do óleo de soja (SSFA). Os resultados indicaram que as misturas contendo RAP apresentaram uma resistência significativamente maior à deformação permanente quando comparadas à mistura de

referência. Especificamente, a mistura com 40% de RAP sem rejuvenescedor apresentou um aumento de 558,9% no Flow Number, evidenciando um desempenho superior.

Por outro lado, a adição do rejuvenescedor SSFA reduziu essa resistência, uma vez que o material atenuou a rigidez do ligante. A mistura com 40% de RAP e 3% de SSFA apresentou uma redução de 11,73% no Flow Number, enquanto a mistura com 40% de RAP e 5% de SSFA teve uma diminuição de 19,99% em relação à mistura apenas com RAP. Apesar dessa redução, as misturas com rejuvenescedor ainda mantiveram valores superiores ao da mistura de referência, indicando que a inclusão do RAP é um fator positivo para o desempenho contra deformações permanentes. Assim, os resultados demonstram que a utilização de RAP melhora significativamente a resistência à deformação permanente, e que a adição do rejuvenescedor deve ser bem dosada para equilibrar os benefícios na resistência à fadiga sem comprometer excessivamente a estabilidade estrutural da mistura.

Os achados de Melo Neto (2022) corroboram com a tendência observada neste estudo. Em ambas as análises, a presença de RAP aumentou a resistência à deformação permanente, enquanto a introdução do agente rejuvenescedor reduziu esse efeito, mas sem comprometer o desempenho estrutural das misturas. Isso reforça a importância de um controle rigoroso na dosagem do rejuvenescedor, garantindo um equilíbrio entre melhoria da vida de fadiga e manutenção da resistência à deformação permanente, aspectos fundamentais para a longevidade dos pavimentos asfálticos reciclados.

5.1.5 Vida de fadiga

A Figura 47 e Figura 48 apresentam os resultados do ensaio de fadiga por compressão diametral sob tensão controlada, dispostos em diagramas log-log de $N \times \Delta\sigma$ e $N \times \varepsilon_i$, respectivamente. Nos gráficos também estão incluídas as curvas de tendência logarítmicas ajustadas aos dados experimentais (curvas de Wöhler), que descrevem o comportamento de fadiga das misturas asfálticas. A partir das equações dessas curvas, foram determinados os parâmetros K_1 e K_2 (Equação 5) e K_3 e K_4 (Equação 6), juntamente com os respectivos coeficientes de determinação (R^2), como detalhado na Tabela 20.

Figura 47. Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões.

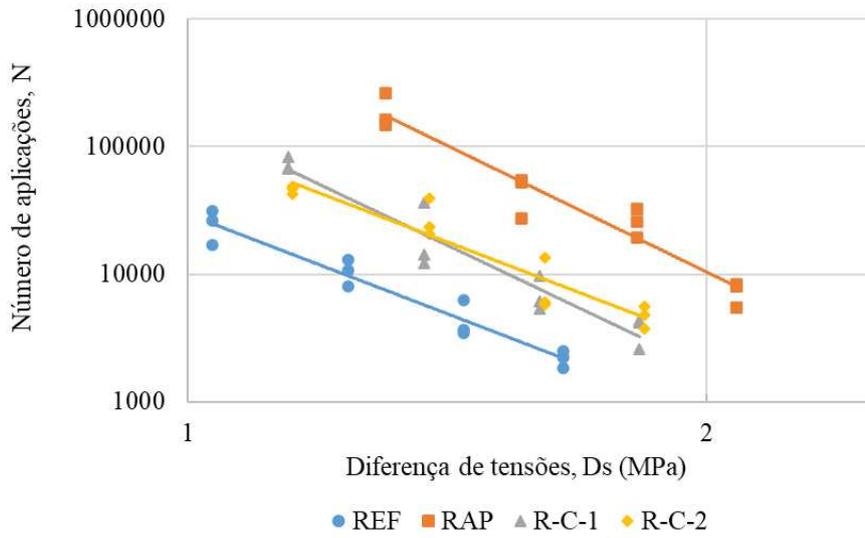


Figura 48. Número de ciclos até a ruptura versus deformação resiliente inicial.

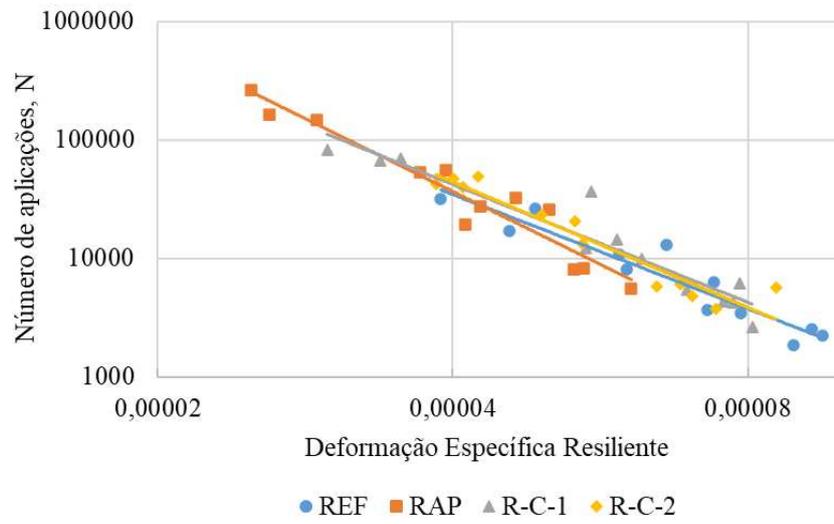


Tabela 20. Resumo das características das curvas de vida de fadiga das misturas.

MISTURA	EQUAÇÃO	R ²	COEFICIENTES	
	$N \times \Delta\sigma$		K_1	K_2
REF	$29526 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{5,172}$	0,878	29526	5,172
	$N \times \varepsilon_i$		K_3	K_4
	$3 \times 10^{-10} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{3,202}$	0,864	3×10^{-10}	3,202
RAP	$N \times \Delta\sigma$	0,880	K_1	K_2
	$997350 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{6,574}$		997350	6,574
	$N \times \varepsilon_i$	K_3	K_4	
	$4 \times 10^{-14} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{4,088}$	0,958	4×10^{-14}	4,088
R-C-1	$N \times \Delta\sigma$	0,946	K_1	K_2
	$156775 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{6,419}$		156775	6,419
	$N \times \varepsilon_i$	K_3	K_4	
	$1 \times 10^{-10} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{3,306}$	0,910	1×10^{-10}	3,306
R-C-2	$N \times \Delta\sigma$	0,865	K_1	K_2
	$107493 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{5,164}$		107493	5,164
	$N \times \varepsilon_i$	K_3	K_4	
	$1 \times 10^{-11} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{3,53}$	0,919	1×10^{-11}	3,53

Observa-se que o coeficiente n_2 , que representa a inclinação das linhas no gráfico $N \times \Delta\sigma$, aumentou com a adição de RAP, o que era esperado devido à maior rigidez dessa mistura. Esse comportamento indica uma maior sensibilidade à variação da diferença de tensões. Quando as cápsulas do Tipo 1 foram incorporadas, houve uma leve redução nos valores de n_2 , embora não de forma significativa. Já as cápsulas do Tipo 2 apresentaram um efeito mais pronunciado, atenuando o impacto da rigidez trazida pelo RAP, o que resultou em valores de n_2 próximos aos da mistura de referência.

De acordo com a análise do gráfico de diferenças de tensões, pode-se observar que as misturas com RAP, devido ao aumento de rigidez, apresentaram um desempenho superior em todas as faixas de tensão, suportando um maior número de ciclos até o surgimento de trincas.

As misturas com os dois tipos de cápsulas exibiram comportamentos semelhantes entre si, aproximando-se do comportamento da mistura de referência. As cápsulas Tipo 1 se destacaram especialmente em baixas tensões, proporcionando uma resistência à fadiga

superior nesse regime. Por outro lado, as cápsulas Tipo 2 se destacaram em tensões intermediárias a altas. Esses resultados indicam que a adição de cápsulas nas misturas com RAP atua diminuindo a rigidez do RAP.

Com base na metodologia proposta por Nascimento para a determinação do fator de fadiga, as misturas asfálticas estudadas puderam ser classificadas quanto a sua resistência à fadiga, conforme mostrado na Tabela 21.

Tabela 21. FFM a partir do ensaio de vida de fadiga por compressão diametral.

Mistura	FFM	Classe
REF	1,06	1
RAP	0,86	2
R-C-1	1,03	2
R-C-2	1,00	2

Estes resultados indicam que a adição das cápsulas não somente melhora a classificação da mistura, quanto aproxima seu FFM ao da mistura de referência, indicando um potencial em restaurar as propriedades do ligante envelhecido presente no RAP, e fazer com que estas misturas asfálticas apresentem características semelhantes àquelas com materiais virgens.

5.1.6 Módulo dinâmico

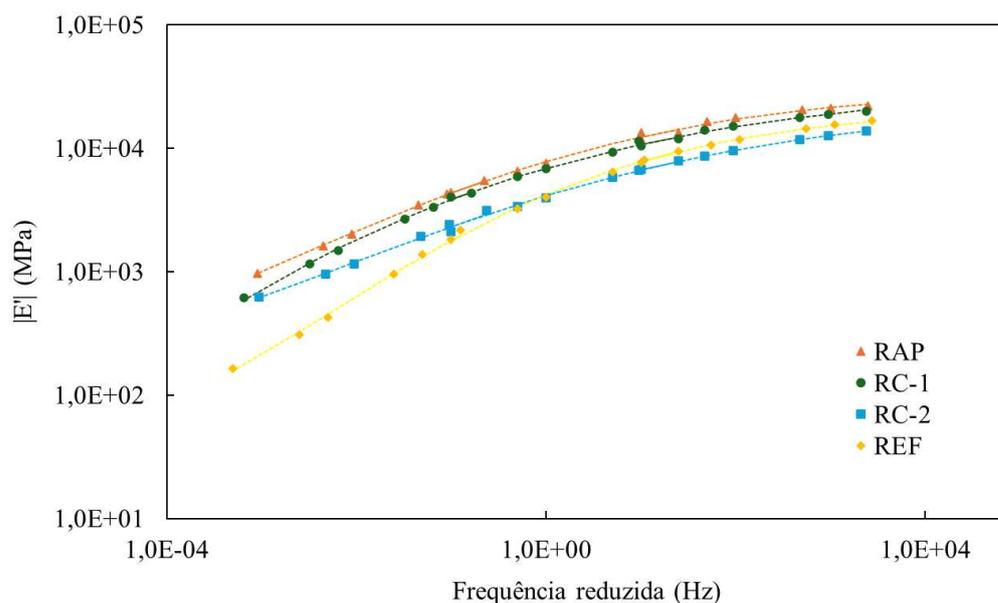
O módulo dinâmico ($\sqrt{E^*}$) representa a rigidez das misturas asfálticas sob carregamento dinâmico e é um dos principais parâmetros para prever o desempenho das misturas em relação à fadiga e à deformação permanente. As curvas mestras foram construídas a partir dos ensaios realizados em diferentes temperaturas e transladadas para a temperatura de referência de 20°C. As funções sigmoidais foram ajustadas para representar a variação do módulo dinâmico em função da frequência reduzida. A Tabela 22 apresenta os coeficientes da função sigmoidal e da função polinomial do shift-factor para cada mistura. Os coeficientes δ e α definem a forma da curva sigmoidal, influenciando diretamente o crescimento do módulo dinâmico com a frequência. Os valores de δ indicam a posição da curva na escala logarítmica, enquanto os valores de α estão relacionados à inclinação da curva e à transição do comportamento viscoelástico.

Tabela 22. Coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal utilizado para determinação do módulo dinâmico.

Mistura	Coeficientes da função polinomial do <i>shift-factor</i>			Coeficientes do modelo sigmoidal			
	a1	a2	a3	δ	α	β	γ
REF	0,0003	-0,1359	2,5796	4,18	3,16	1,11	0,60
RAP	0,0006	-0,1401	2,5505	5,00	2,49	1,09	0,53
R-C-1	0,0004	-0,1354	2,5348	4,12	3,32	1,45	0,48
R-C-2	0,0006	-0,1386	2,5221	4,96	2,37	0,75	0,48

A Figura 49 apresenta as curvas mestras das misturas analisadas. As misturas RAP e R-C-1 exibiram os maiores valores de módulo dinâmico ao longo de toda a faixa de frequência reduzida, enquanto a mistura REF apresentou os menores valores. A mistura R-C-2 teve valores intermediários, mas com menor inclinação na região de altas temperaturas (baixas frequências), sugerindo um comportamento mais estável. A tendência geral confirma que o módulo dinâmico aumenta com a frequência de carregamento, caracterizando maior rigidez sob carregamentos rápidos. Em baixas frequências, a redução do módulo dinâmico está associada ao comportamento mais viscoso da mistura. A mistura RAP apresentou o maior valor de módulo dinâmico na maior parte das frequências, evidenciando que a incorporação de material reciclado pode aumentar a rigidez da mistura. A mistura R-C-1 (cápsulas Tipo 1) teve valores superiores aos da mistura R-C-2, indicando que o teor de óleo encapsulado pode influenciar na rigidez da mistura.

Figura 49. Curvas mestras das misturas das misturas asfálticas estudadas na temperatura de referência de 20°C, em escala log-log



A Tabela 23 apresenta os coeficientes sigmoidal ajustados para o módulo de armazenamento (E'). Os valores de $\max E'$ confirmam que a mistura RAP possui o maior valor de rigidez máxima, seguida por R-C-1, REF e R-C-2. Os coeficientes δ e γ influenciam a curvatura da função de ajuste, e as misturas com maiores valores de δ tendem a apresentar uma transição mais brusca entre a rigidez mínima e máxima. Dessa forma, a mistura RAP teve a maior rigidez global. A mistura R-C-2, apesar de ter cápsulas com maior teor de óleo, apresentou menor rigidez do que a R-C-1, reforçando o efeito do rejuvenescedor encapsulado na redução da rigidez da mistura. A mistura REF apresentou valores inferiores às misturas com RAP, indicando a menor rigidez do ligante virgem.

Tabela 23. Coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal utilizado para determinação do módulo de armazenamento.

Mistura	Coeficientes do ajuste sigmoidal			
	$\max E'$ (kPa)	k	δ	γ
REF	2,20E+07	4,18	-1,11	-0,60
RAP	3,08E+07	5,00	-1,09	-0,53
R-C-1	2,77E+07	4,12	-1,45	-0,48
R-C-2	2,16E+07	4,96	-0,75	-0,48

A Tabela 24 apresenta os tempos de relaxação e os módulos de Maxwell ajustados para cada mistura. Os ajustes da série de Prony para o módulo de armazenamento (E') e o módulo de relaxação foram conduzidos utilizando o método de colocação. A série foi descrita com 17 termos, variando os tempos de relaxação (π_i) entre $2,0 \times 10^8$ e $2,0 \times 10^{-8}$ s, com intervalos de uma década. Os resultados evidenciam que a mistura RAP apresentou os maiores valores de E_i .

Tabela 24. Tempos de relaxação (ρ_i) e módulos do elemento de Maxwell (E_i) para as séries de Prony.

ρ_i	E_i			
	REF	RAP	R-C-1	R-C-2
2,00E+08	2236	20402	8886	19235
2,00E+07	1368	10105	4635	7883
2,00E+06	3496	25835	12728	20420
2,00E+05	7182	48436	27292	35375
2,00E+04	16766	101061	66983	67890
2,00E+03	44375	225155	176802	136503
2,00E+02	134377	527398	471979	286842
2,00E+01	433720	1212841	1148440	605026
2,00E+00	1260030	2463852	2299806	1195277
2,00E-01	2734317	4013594	3577542	2043936
2,00E-02	4052731	5030474	4321408	2862898
2,00E-03	4222009	4953109	4220446	3245590
2,00E-04	3396792	4051576	3519656	3055526
2,00E-05	2323018	2920571	2633340	2494197
2,00E-06	1444468	1942255	1834680	1841969
2,00E-07	850323	1228161	1220132	1271375
2,00E-08	500179	778011	815247	869636

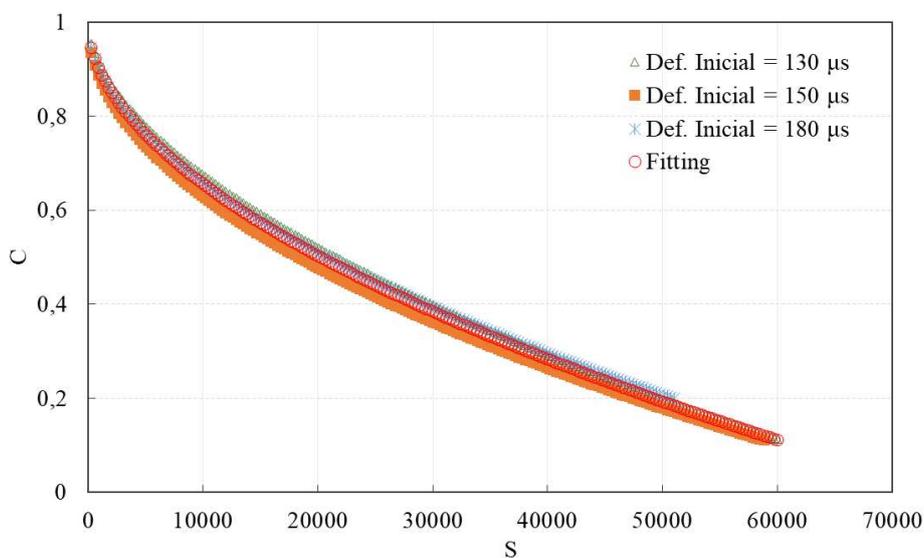
A análise do módulo dinâmico das misturas asfálticas revelou que a incorporação de RAP e cápsulas de rejuvenecedor influencia diretamente a rigidez e o comportamento viscoelástico das misturas. A análise dos coeficientes de ajuste sigmoideal e das séries de Prony indicou que as misturas modificadas por cápsulas possuem transições mais suaves entre os estados viscoelástico e elástico.

5.2 APLICAÇÃO DO MODELO SIMPLIFICADO DE DANO CONTÍNUO (S-VECD)

A aplicação do modelo S-VECD para a análise da fadiga foi conduzida por meio de uma série de cálculos no Excel, permitindo a obtenção das curvas características de cada material, representadas por C versus S. Nessas curvas, C indica a integridade do material, enquanto S representa o acúmulo de dano ao longo do tempo. O modelo foi ajustado considerando diferentes amplitudes de deformação, variando entre 130 e 180 μ s para cada amostra. Conforme discutido por Daniel e Kim (2002), as curvas C versus S devem se sobrepôr independentemente da magnitude da deformação aplicada durante os ensaios, pois essa curva caracteriza a resposta intrínseca do material, sendo invariável às condições de carregamento e temperatura.

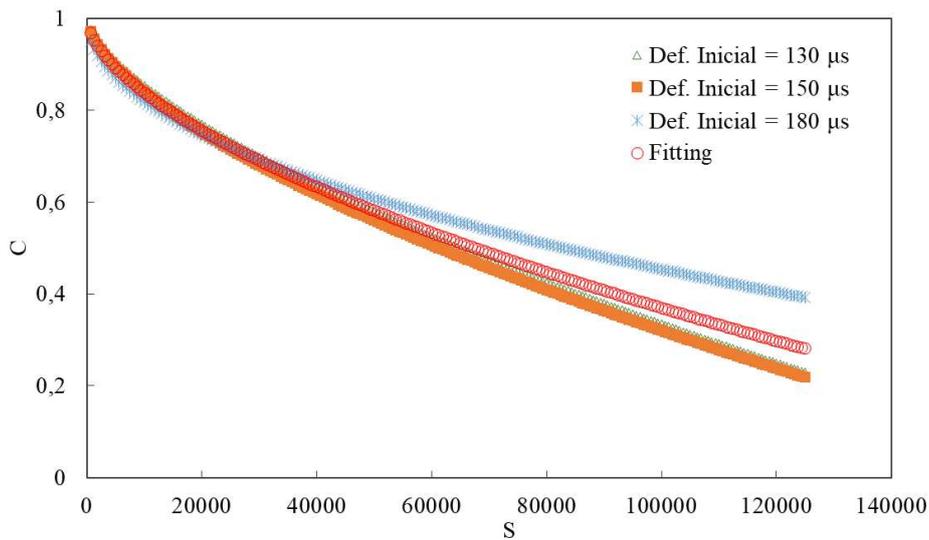
Para a aplicação do modelo foram utilizados os dados obtidos a partir do ensaio de módulo complexo (*fingerprint*), realizado antes de cada teste de fadiga, além dos próprios resultados do ensaio de fadiga. A partir do conjunto de curvas de cada mistura, foi ajustado um modelo matemático para determinar a curva característica de dano correspondente. O comportamento do material foi descrito por uma equação baseada na lei de potência, expressa como $C = 1 - C_{11}S^{C_{12}}$, onde C_{11} e C_{12} são as constantes de regressão. A Figura 50. Curva C x S da mistura REF. representa a curva C x S da mistura REF, a título de exemplificação.

Figura 50. Curva C x S da mistura REF.



A análise das curvas C x S das diferentes misturas asfálticas mostra que elas se sobrepõem, indicando que, mesmo quando submetidas a diferentes níveis de deformação, o comportamento do material em relação ao dano permanece semelhante. Esse resultado confirma a validade do modelo S-VECD, que estabelece que a relação entre a integridade do material (C) e o acúmulo de dano (S) é uma propriedade intrínseca da mistura, independentemente das condições de carregamento e temperatura. A Figura 51 apresenta a curva da mistura RAP, em que essa sobreposição não ocorre de maneira efetiva como visto na mistura de referência.

Figura 51. Curvas CxS da mistura RAP.



Nas misturas que contêm RAP, é comum que essa sobreposição não ocorra nos pontos próximos à ruptura, o que pode estar associado à heterogeneidade do material, resultando em uma resposta menos uniforme ao longo do ensaio. Especificamente, a mistura R-C-2 apresentou esse comportamento heterogêneo de forma mais pronunciada, uma das possíveis explicações para este fato deve-se a possibilidade das capsulas não terem rompido sob a ação do carregamento, acarretando o comportamento verificado para a deformação inicial de 180ms. Outras hipóteses podem ser levantadas, como a variabilidade na distribuição das cápsulas no interior de cada corpo de prova, podendo criar zonas com maior/menor concentração de cápsulas, ou até mesmo que os CP's moldados a partir de uma mesma mistura contenham teores de cápsulas um pouco distintos. As curvas das misturas R-C-1 e R-C-2 estão apresentadas a seguir nas Figuras Figura 52 e Figura 56.

Figura 52. Curvas CxS da mistura R-C-1.

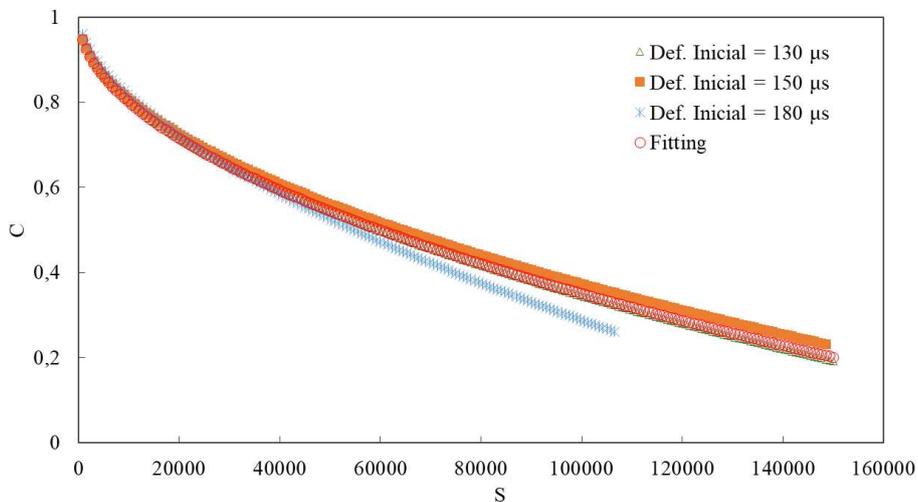
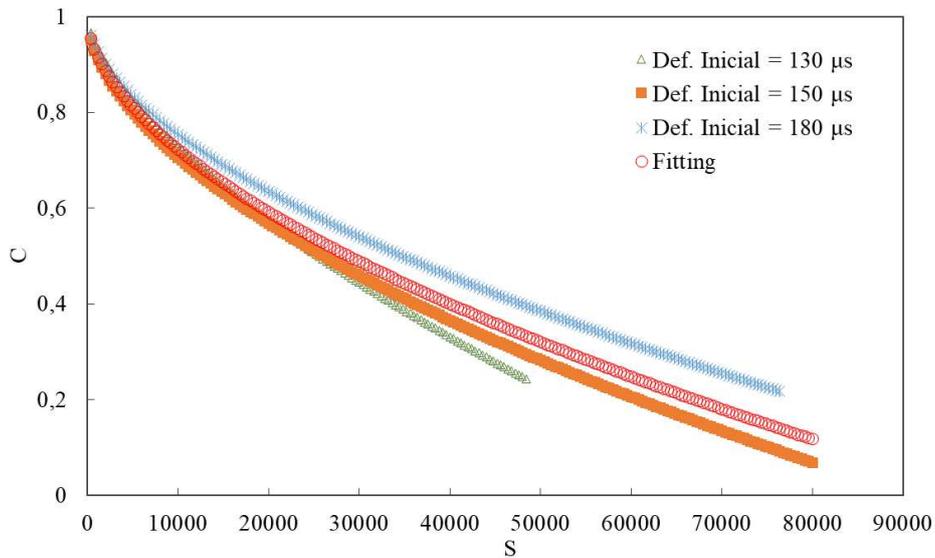
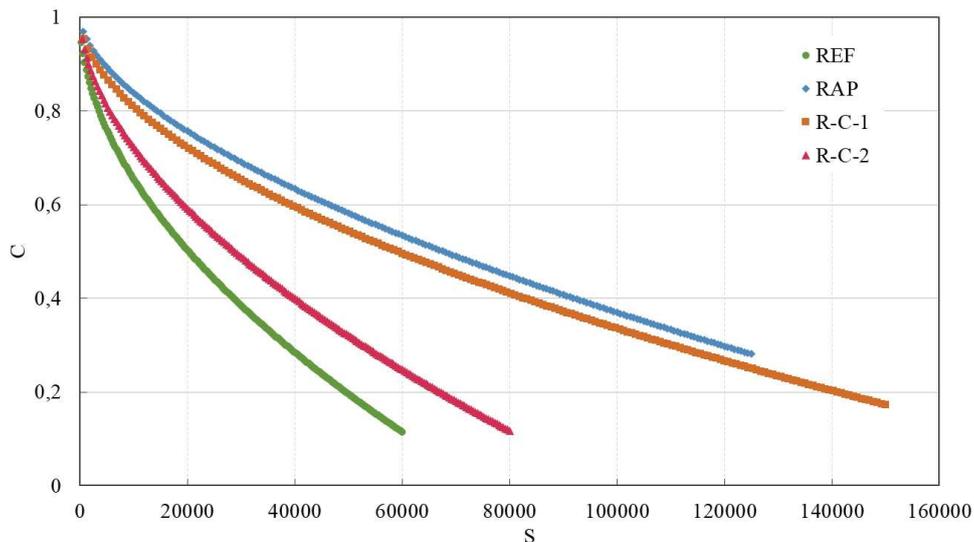


Figura 53. Curvas CxS da mistura R-C-2.



A Figura 54 apresenta o *fitting*, ou seja, a curva característica de dano das curvas $C \times S$ das misturas estudadas.

Figura 54. Curvas características de dano das misturas asfálticas estudadas.



Ao analisar as curvas características de dano, observa-se que a mistura RAP apresentou a menor taxa de perda de integridade ao longo do ensaio, indicando maior resistência ao dano acumulado. As misturas R-C-1 e R-C-2 demonstraram um comportamento intermediário, com a R-C-1 exibindo uma degradação mais lenta do que a R-C-2, o que sugere que as cápsulas do Tipo 1 ajudaram a reduzir a rigidez do RAP sem comprometer seu desempenho de integridade. A mistura de referência (REF) foi a que apresentou a maior taxa de perda de integridade nos primeiros ciclos, evidenciando menor resistência ao acúmulo de dano. Esses resultados indicam que a adição de cápsulas

rejuvenescedoras nas misturas com RAP modifica a evolução do dano, com a R-C-1 apresentando um melhor desempenho geral.

Os resultados obtidos neste estudo estão em concordância com os apresentados por Correa (2020), em que as misturas contendo RAP demonstraram uma menor taxa de perda de integridade em comparação com as misturas de referência. Em ambos os casos, a incorporação de RAP contribuiu para um aumento na resistência ao dano acumulado, refletindo-se em curvas C versus S com menor inclinação ao longo do ensaio de fadiga. Esse comportamento pode ser atribuído à presença do ligante envelhecido no RAP, que confere maior rigidez à mistura e reduz a taxa de degradação inicial. A Tabela 25 apresenta os valores obtidos para a taxa de evolução do dano (α), que representa a taxa de perda do módulo de relaxação em relação ao tempo; e os coeficientes C_{11} e C_{12} da curva característica de dano das misturas asfálticas estudadas.

Tabela 25. Taxa de evolução de dano α , os coeficientes C11 e C12 da curva característica de dano das misturas asfálticas estudadas.

	Fitting curvas $C \times S$		α
	C_{11}	C_{12}	
REF	0,002625	0,529467	3,16
RAP	0,000693	0,591748	4,08
R-C-1	0,001808	0,511046	3,53
R-C-2	0,001650	0,556437	4,51

Para complementar a análise do comportamento quanto à fadiga das misturas asfálticas estudadas, foram utilizadas as envoltórias de ruptura sob dois critérios de falha, o G^R e o D^R , assim como cálculo do parâmetro S_{app} , conforme descrito no tópico 4.2.6.1.

A Figura 55 apresenta as envoltórias de ruptura $G^R \times N_f$, e a Tabela 23 apresenta os coeficientes de regressão das envoltórias de ruptura para cada mistura asfáltica estudada, assim como os valores resultantes do cálculo do critério de falha D^R e do parâmetro S_{app} .

Figura 55. Envoltória de ruptura G^R vs. N_f para as misturas asfálticas estudadas.

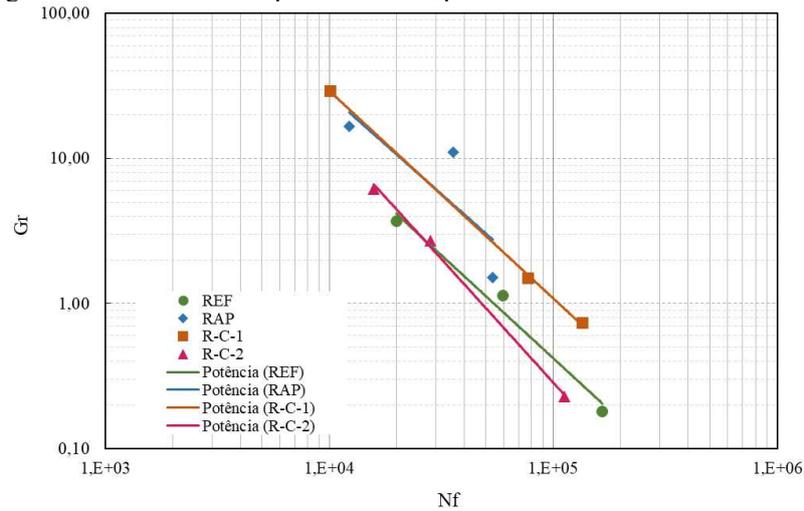


Tabela 26. Coeficientes de regressão do critério GR, critério DR e parâmetro Sapp.

	Critério de ruptura G_R			Critério de ruptura D_R		S_{APP}
	γ	Δ	R^2	γ	D_R	
REF	5,38E+06	-1,421	0,99	0,47	10,98	
RAP	8,13E+06	-1,368	0,97	0,44	11,71	
R-C-1	1,54E+07	-1,430	0,95	0,45	17,36	
R-C-2	9,58E+07	-1,705	0,9	0,48	6,00	

Os resultados de D_R mostram que as misturas apresentaram variações no acúmulo de danos ao longo do ensaio. A mistura RAP teve o menor valor de D_R , indicando menor dissipação de energia e, portanto, uma menor propensão ao acúmulo de danos, enquanto R-C-2 apresentou o maior valor, sugerindo maior tendência à degradação.

Quanto ao S_{app} , a mistura R-C-1 obteve o melhor desempenho, com um valor que a coloca no intervalo adequado para tráfego entre 10 e 30 milhões de eixos, indicando boa resistência à fadiga. Já R-C-2 ficou abaixo do valor mínimo recomendado para tráfego padrão, mostrando uma capacidade inferior de resistir à fadiga. As misturas REF e RAP apresentaram S_{app} dentro do intervalo considerado adequado para tráfego padrão, com RAP se destacando por manter um bom desempenho.

Sabe-se que misturas com curvas mais acima e à direita no gráfico apresentam melhor desempenho à fadiga, pois indicam um maior número de ciclos até a falha (N_f) para um determinado valor do parâmetro G^R (CORREA, 2020). Além disso, misturas com menores inclinações nas curvas demonstram uma progressão de dano mais lenta, sugerindo maior resistência à degradação ao longo do tempo.

No caso das misturas estudadas, os resultados mostram que a mistura R-C-1 apresentou o melhor desempenho, situando-se mais à direita no gráfico e com uma

inclinação reduzida, o que indica maior resistência à fadiga e menor taxa de dano. A mistura R-C-2, embora também contenha cápsulas de rejuvenescedor, apresentou um comportamento inferior à R-C-1, com uma curva mais inclinada e deslocada para a esquerda, sugerindo um menor ganho em durabilidade.

A mistura RAP demonstrou um desempenho intermediário, ficando acima da mistura de referência (REF) e abaixo das misturas com cápsulas. Isso sugere que a presença de RAP contribuiu para uma leve melhora na fadiga, mas não de forma tão expressiva quanto a inclusão de rejuvenescedores encapsulados. Por fim, a mistura REF obteve os piores resultados, posicionando-se mais à esquerda e com a inclinação mais acentuada, indicando menor resistência à fadiga e maior taxa de degradação ao longo dos ciclos. Estes resultados podem ser um indicativo de que o envelhecimento e/ou uso de materiais envelhecidos não necessariamente traz prejuízos quanto ao desempenho a fadiga das misturas asfálticas. Comportamento semelhante foi encontrado por (CORREA, 2020), quando misturas com 30% RAP apresentaram comportamento superior as misturas com 10% RAP e as misturas de referência.

Esses resultados indicam que a adição de cápsulas de rejuvenescedor influenciou positivamente o desempenho à fadiga, sendo mais eficaz na mistura R-C-1. Já a mistura R-C-2, apesar de conter maior teor de óleo nas cápsulas, não apresentou o mesmo desempenho. Resultado semelhante foi observado por (ALMEIDA JÚNIOR, 2022) em suas misturas asfálticas 100% recicladas com teores de AR de 8, 12 e 16%. O autor observou que a mistura com 8% de AR apresentou comportamento superior a mistura de referência, e que a mistura de 12% demonstrou resultados ainda melhores. No entanto, ao incorporar uma quantidade maior de AR (16%), o desempenho da mistura asfáltica caiu em relação as demais. No presente trabalho, a queda no desempenho quando incluídas cápsulas com maior teor de AR pode ser um indicativo de que esse aumento causou uma perda de adesão entre os agregados e o ligante asfáltico, uma vez que o AR age reduzindo a viscosidade do ligante asfáltico.

A Figura 56 apresenta o resultado gráfico da aplicação da simulação do Nf a partir da metodologia proposta por Nascimento (2016) apud Possebon (2021). A Tabela 27. Fator de Fadiga das Misturas. apresenta os valores encontrados para o fator de fadiga da mistura (FFM), obtidos após a aplicação da Equação 30:

$$FFM = \left(\frac{\log(N_{f100\mu\epsilon}) + \log(N_{f200\mu\epsilon})}{2} \right) * (\log(200) - \log(100)) \quad (30)$$

Onde:

$N_{f100\mu\epsilon}$ representa a vida de fadiga da mistura asfáltica sob uma deformação de 100 *microstrain* ($\mu\epsilon$); e

$N_{f200\mu\epsilon}$ representa a vida de fadiga da mistura asfáltica sob uma deformação de 200 *microstrain* ($\mu\epsilon$).

Figura 56. Simulação da vida de fadiga a partir do critério de ruptura G^R .

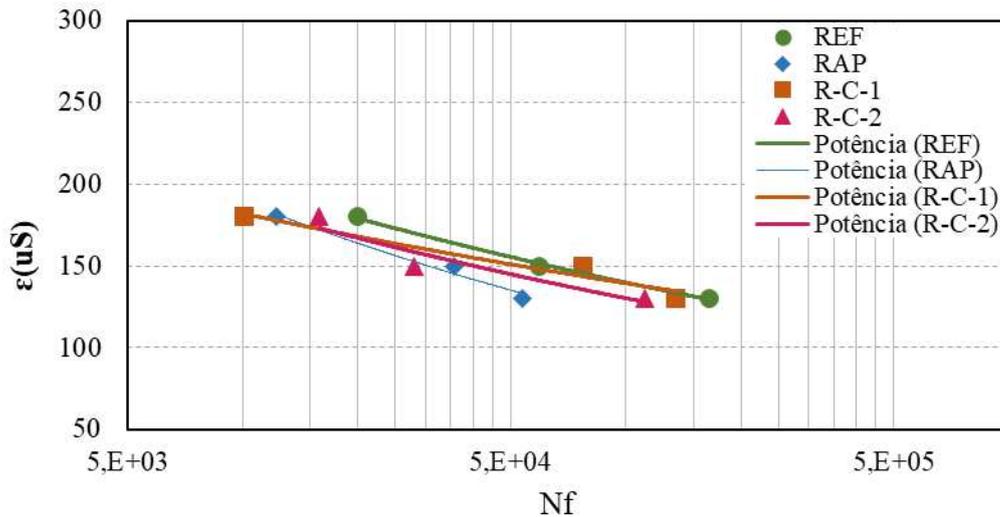


Tabela 27. Fator de Fadiga das Misturas.

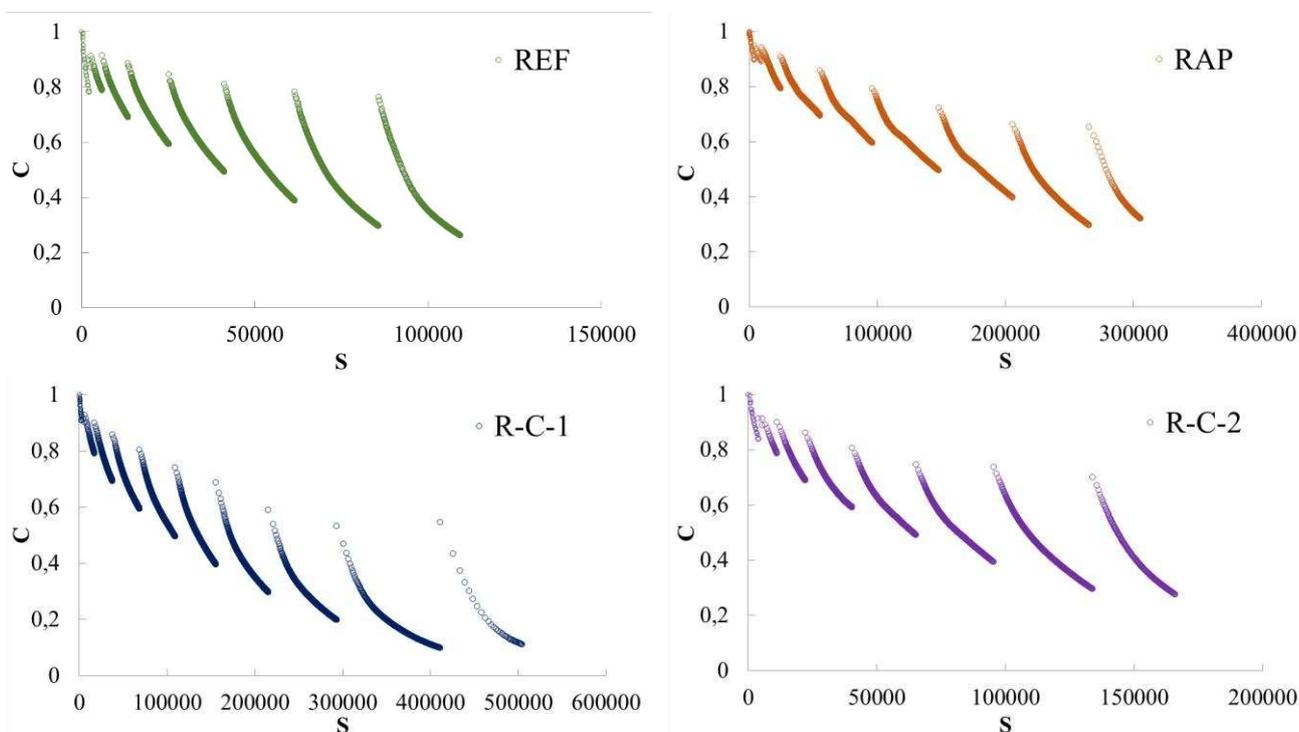
Mistura	FFM
REF	1,40
RAP	1,57
R-C-1	1,27
R-C-2	1,39

Quando analisamos, por meio do FFM, a resistência à fadiga das misturas asfálticas com base na vida útil medida em diferentes níveis de deformação, vemos que, de acordo com o que foi visto com base no critério de falha GR, a mistura RAP ainda é a que apresenta melhor desempenho. É válido ressaltar que a mistura com as cápsulas do Tipo 2, embora não apresente desempenho superior a mistura RAP, demonstra comportamento semelhante ao da mistura de referência, indicando que a utilização do AR pode trazer às misturas recicladas propriedades semelhantes às de misturas com materiais virgens.

5.2.1 Mensuração da regeneração

A aplicação dos períodos de repouso no ensaio de fadiga à tração direta resultou em descontinuidades na curva característica de dano ($C \times S$), refletindo o efeito da regeneração do material. Observou-se que, logo após cada período de repouso, houve um aumento momentâneo da integridade (C), indicando uma recuperação parcial da estrutura da mistura. No entanto, essa recuperação não se manteve ao longo do carregamento subsequente, pois a inclinação acentuada dos pontos no primeiro ciclo após o repouso evidenciou um comportamento transitório, com rápida perda da integridade recuperada. A Figura 57 representa as curvas características de dano com períodos de repouso das misturas asfálticas estudadas.

Figura 57. Curvas características de dano com períodos de repouso das misturas estudadas.



Além disso, os valores elevados de integridade registrados logo após o repouso não alteraram diretamente o índice de regeneração (%HS), pois esse parâmetro é determinado a partir das variações no espaço de dano (S), conforme descrito no tópico 4.2.6.2. Dessa forma, apesar de os períodos de repouso contribuírem para a recuperação temporária do material, a progressão do dano ao longo dos ciclos continuou sendo um fator determinante para a vida de fadiga da mistura. A Tabela 28 apresenta os valores obtidos para cada uma das misturas asfálticas estudadas.

Tabela 28. Índice de regeneração no espaço CxS.

	Nível de integridade	Dano na integridade de repouso	Varição de dano entre pontos de mesma integridade	Índice de regeneração
	C	S_{C_i}	ΔS_{H_i}	$\%H_S$
REF	0,9	2515	767	31
	0,8	5935	3308	56
	0,7	13430	6409	48
	0,6	25224	9353	37
	0,5	41241	12654	31
	0,4	61521	15470	25
	0,3	85706	19542	23
		MÉDIA		
RAP	0,9	9552	5075	53
	0,8	24549	12083	49
	0,7	55599	19784	36
	0,6	96179	28189	29
	0,5	147898	32856	22
	0,4	205597	34012	17
		MÉDIA		
R-C-1	0,9	4678	2536	54
	0,8	17264	9226	53
	0,7	37859	15527	41
	0,6	68762	22036	32
	0,5	109312	26858	25
	0,4	155684	33615	22
	0,3	215529	41676	19
	0,2	293384	57220	20
	MÉDIA			33
R-C-2	0,9	4074	1451	36
	0,8	11179	5170	46
	0,7	22229	8828	40
	0,6	40455	13098	32
	0,5	65196	17522	27
	0,4	95336	24535	26
	0,3	133901	29124	22
		MÉDIA		

A análise dos resultados obtidos para a regeneração das misturas asfálticas revelou que a mistura de referência (REF) apresentou o maior índice médio de regeneração (%HS), enquanto as demais misturas, incluindo aquelas contendo RAP e cápsulas de rejuvenecedor, exibiram valores semelhantes de %HS. Observou-se que, independentemente da composição, a regeneração foi mais expressiva nos estágios

iniciais de dano, mas sua eficácia diminuiu progressivamente conforme o dano se acumulava, conforme esperado.

Os resultados também demonstraram uma semelhança no índice médio de regeneração entre as misturas contendo RAP e a mistura de referência, que não possui material reciclado. Essa proximidade nos valores sugere que, pelo menos para o teor de 20% de RAP avaliado neste estudo, não há indicativos fortes de que a incorporação de RAP prejudique significativamente a capacidade de regeneração das misturas asfálticas. Dada a hipótese de que o RAP tem um impacto negativo relevante na regeneração, seria esperado que sua presença reduzisse a recuperação da integridade da mistura, devido ao envelhecimento do ligante contido no material reciclado. No entanto, os valores observados indicam que a regeneração ocorreu de forma semelhante à da mistura com apenas ligante virgem, o que pode sugerir que, em teores moderados, o RAP ainda mantém um nível de regeneração compatível com misturas convencionais. Essa observação reforça a viabilidade do uso de RAP em proporções moderadas, sem comprometer significativamente a recuperação estrutural do material sob carregamentos cíclicos e períodos de repouso.

A ausência de uma diferença significativa entre as misturas com cápsulas de rejuvenecedor e aquelas contendo apenas RAP levanta a hipótese de que o rejuvenecedor encapsulado pode não ter sido efetivamente liberado durante o ensaio de fadiga. Se as cápsulas tivessem se rompido de maneira eficiente, seria esperado um desempenho superior das misturas R-C-1 e R-C-2, uma vez que a ação do rejuvenecedor promoveria um maior fechamento das microtrincas e a restauração das propriedades do ligante asfáltico. No entanto, como os valores de %HS das misturas com cápsulas não superaram os da mistura RAP, há a possibilidade de que o encapsulamento dificultou a liberação do óleo rejuvenecedor sob as condições aplicadas no ensaio.

Além disso, a mistura R-C-2, que contém um maior teor de óleo encapsulado, não apresentou uma recuperação mais expressiva do que a mistura R-C-1, reforçando a hipótese de que o rejuvenecedor pode não ter sido liberado na matriz asfáltica em quantidade suficiente para influenciar significativamente a regeneração. Esse comportamento está alinhado com a retenção do óleo dentro da matriz polimérica das cápsulas Tipo 2, conforme discutido no tópico 4.2.1.2, indicando que a quantidade adicional de óleo presente nessas cápsulas pode não estar totalmente disponível para interagir com o ligante asfáltico.

Dessa forma, os resultados indicam que, embora os períodos de repouso tenham contribuído para a regeneração das misturas asfálticas, o efeito das cápsulas de rejuvenecedor não foi significativo em comparação com a regeneração observada na mistura contendo RAP.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo investigou a capacidade de regeneração de misturas asfálticas recicladas com a incorporação de agentes rejuvenescedores encapsulados, analisando seu desempenho mecânico e sua resposta ao dano acumulado sob carregamentos cíclicos. A aplicação do modelo S-VECD permitiu avaliar a integridade estrutural das misturas e compreender melhor os efeitos da adição de RAP e das cápsulas na fadiga e na capacidade regenerativa do material.

A caracterização mecânica das misturas revelou que a adição de RAP resultou em maior rigidez, enquanto a incorporação das cápsulas reduziu essa rigidez, possivelmente devido à liberação parcial do óleo encapsulado. A resistência à umidade foi preservada em todas as misturas, e a resistência à deformação permanente foi favorecida pelo RAP, sendo esse efeito ampliado pela presença das cápsulas, especialmente nas misturas contendo o Tipo 1. A análise da fadiga por compressão diametral demonstrou que as misturas com cápsulas se aproximaram do desempenho da mistura de referência, reduzindo a rigidez do RAP e proporcionando um comportamento mecânico mais equilibrado, com destaque para as cápsulas Tipo 1 em baixas tensões e Tipo 2 em tensões mais elevadas.

O modelo S-VECD permitiu avaliar a evolução do dano e a integridade das misturas, evidenciando que a mistura RAP teve menor taxa de perda de integridade, enquanto as misturas com cápsulas apresentaram um comportamento intermediário. A mistura R-C-1 mostrou uma degradação mais lenta em relação à R-C-2, sugerindo que a composição das cápsulas impacta o processo de dano acumulado. Adicionalmente, a análise das curvas características de dano confirmou que a presença de cápsulas rejuvenescedoras modificou a progressão da fadiga, com potencial para prolongar a vida útil das misturas recicladas.

No que se refere à mensuração da capacidade regenerativa, observou-se que, apesar da expectativa de que a adição de cápsulas amplificasse a recuperação estrutural das misturas, os resultados indicam que a regeneração das misturas com RAP e cápsulas foi semelhante à da mistura de referência. Isso sugere que o RAP, em teores moderados, não compromete significativamente a capacidade de regeneração das misturas, e que a liberação do agente rejuvenescedor encapsulado pode ter sido limitada sob as condições de ensaio.

Hipóteses foram levantadas para explicar esse comportamento, incluindo a possibilidade de que as cápsulas não tenham rompido de maneira eficiente durante os ensaios, ou que a distribuição das cápsulas na matriz asfáltica tenha sido heterogênea, influenciando os resultados. A retenção do óleo dentro da matriz polimérica das cápsulas Tipo 2 pode ter restringido sua interação com o ligante, limitando sua influência na melhoria da regeneração.

A análise do comportamento das misturas pelo modelo S-VECD é um processo complexo, pois envolve a avaliação de diversos parâmetros que refletem diferentes aspectos do desempenho mecânico do material. Parâmetros que privilegiam rigidez podem indicar que uma determinada mistura é superior, enquanto aqueles que enfatizam flexibilidade podem apontar vantagem para outra formulação. Dessa forma, a análise isolada de critérios individuais pode gerar interpretações conflitantes. Portanto, é necessário correlacionar todas as variáveis dentro do modelo para obter uma compreensão consolidada dos resultados.

Portanto, conclui-se que a incorporação de agentes rejuvenescedores encapsulados nas misturas recicladas modifica suas propriedades mecânicas e sua resposta ao dano acumulado. No entanto, os resultados não demonstraram um impacto significativo na capacidade regenerativa das misturas, sugerindo que a liberação controlada do rejuvenescedor é um aspecto fundamental a ser otimizado em futuros estudos. Dessa forma, a viabilidade do uso de RAP em misturas asfálticas com cápsulas rejuvenescedoras ainda requer investigações adicionais para melhor compreender os mecanismos envolvidos e maximizar seus benefícios na regeneração de pavimentos.

7. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Os resultados desta pesquisa forneceram contribuições significativas para a compreensão do fenômeno de autorregeneração em misturas asfálticas recicladas com rejuvenescedores encapsulados. No entanto, alguns aspectos ainda podem ser aprofundados para ampliar o entendimento sobre o comportamento dessas misturas e otimizar sua aplicação em pavimentos. Diante disso, sugerem-se as seguintes direções para estudos futuros:

- **Avaliação do desempenho de misturas com ligante modificado e diferentes teores de RAP:** Realizar estudos similares utilizando ligante asfáltico modificado com agente rejuvenescedor, variando os teores de RAP por meio da metodologia de **blend chart**, a fim de analisar a interação entre o ligante modificado e os diferentes níveis de material envelhecido.
- **Influência do teor de RAP na regeneração da mistura:** Investigar o fenômeno de autorregeneração em misturas contendo diferentes teores de RAP, a fim de identificar o limite em que o material envelhecido compromete negativamente a capacidade de regeneração da mistura.
- **Aprimoramento da aplicação do modelo S-VECD em misturas asfálticas recicladas:** Expandir os estudos que utilizam o modelo S-VECD para análise de misturas recicladas, visando uma melhor adaptação do modelo às características heterogêneas desse tipo de material.
- **Otimização da liberação do rejuvenescedor encapsulado:** Embora os resultados obtidos não comprovem diretamente que as cápsulas permaneceram intactas durante o ensaio, há indícios dessa possibilidade. Assim, estudos futuros podem explorar ajustes na formulação das cápsulas ou no método de incorporação ao ligante asfáltico para garantir a liberação eficaz do rejuvenescedor ao longo da vida útil do pavimento.
- **Tomografia computadorizada para análise da distribuição das cápsulas:** Aplicação de técnicas de tomografia computadorizada para avaliar a dispersão e a homogeneidade da distribuição das cápsulas dentro do corpo de prova, permitindo um entendimento mais detalhado do seu posicionamento e possível influência na regeneração da mistura.
- **Análises microscópicas pós-ensaio:** Utilização de técnicas como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia no Infravermelho

por Transformada de Fourier (FTIR) para investigar se houve dispersão do rejuvenescedor na matriz asfáltica após os ensaios mecânicos, contribuindo para a compreensão do mecanismo de regeneração do material.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Lêda Lucena e Paulo Marinho.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos fornecida para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande, pela infraestrutura. À Petrobras e JBR Engenharia pela parceria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALHADDAD, A. Fatigue evaluation of Iraqi asphalt binders based on the dissipated energy and viscoelastic continuum damage (VECD) approaches. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, v. 6, p. 27–50, 1 maio 2015.

AL-MANSOORI, T. **Encapsulated healing agents for asphalt self-healing**. 2018. Tese (Doutorado) – University of Nottingham, Nottingham, Reino Unido, 2018.

AL-MANSOORI, T. *et al.* Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators. *Construction and Building Materials*, v. 161, p. 330–339, fev. 2018.

AL-MANSOORI, T.; NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; MICAEL, R.; GARCÍA, Á. Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators. *Construction and Building Materials*, v. 161, p. 330–339, 2018a.

AL-MANSOORI, Tariq; NORAMBUENA-CONTRERAS, Jose; GARCIA, Alvaro. **A Self-Healing Asphalt Mixture by the Action of Microcapsules That Is Ready to Be Used On-Site**. 2018.

ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B. DE. **Reciclagem de misturas 100%RAP: investigação de parâmetros para avaliação e dosagem de agentes rejuvenescedores com foco na fadiga**. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

ALSARAYREH, D.; JIMÉNEZ DEL BARCO CARRIÓN, A. Evaluation of the Mechanical Performance of Warm Bio-Recycled Asphalt Mixtures. *Sustainability*, v. 16, n. 3, p. 1287, 2024.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. M320: **Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder**. 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. TP 107-14: **Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Fatigue Life of Asphalt Binder Using the Linear Amplitude Sweep**. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. C127: **Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate**. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. C131: **Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine**. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. C136/C136M: **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D4791: **Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate**. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D5821: **Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate**. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D2041/D2041M: **Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures**. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D2172: **Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures**. 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D2419: **Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate**. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D2872: **Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test)**. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D36/D36M: **Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)**. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D4402/D4402M: **Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer**. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D5/D5M: **Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials**. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D6373: **Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder**. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D7405: **Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D7867: **Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Asphalt Binder Using the Linear Amplitude Sweep**. 2013.

AYAR, P.; MORENO-NAVARRO, F.; GÁMEZ, M. The healing capability of asphalt pavements: A state of the art review. *Journal of Cleaner Production*, v. 113, p. 28–40, 2016.

BABADOPULOS, L. **A contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BABADOPULOS, L.; SOARES, J.; CASTELO BRANCO, V. Interpreting fatigue tests in hot mix asphalt (HMA) using concepts from viscoelasticity and damage mechanics. *Transportes*, v. 23, p. 85–96, 2015.

BARROS, Ablenya Grangeiro de. **O efeito do uso de agentes rejuvenescedores encapsulados sobre a autorregeneração de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado) 2020.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras; Abeda, 2022. 750 p. ISBN 978-85-69658-02-3.

BOEIRA, F. D. *et al.* Projeto e implementação de ensaio de fadiga por tração-compressão direta (uniaxial) para avaliação de dano em misturas asfálticas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 3, 2018.

BRANDON, D.; KAPLAN, W. D. **Microstructural Characterization of Materials**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2013.

BRITO, L. A. T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CARVALHO, L. P.; ANDRADE, C. C.; SILVA, G. E. L. Óleo de algodão: alternativa para biodiesel. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 5, p. 546–552, 2008.

CASTRO, M.; SÁNCHEZ, J. A. Fatigue and Healing of Asphalt Mixtures: Discriminate Analysis of Fatigue Curves. *Journal of Transportation Engineering*, v. 132, n. 2, p. 168–174, 2006.

COLPO, G. B. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

COSTA, L. F. D. **Misturas asfálticas recicladas a quente contendo aditivos: avaliação do desempenho mecânico, econômico e ambiental**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, 2023.

DANIEL, J. S.; KIM, Y. R. Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic, continuum damage model. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 71, p. 619–650, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Norma DNIT 031/2024 – ES: **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Brasília, 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Norma DNIT 095/2006: **Pavimentos flexíveis – Determinação do módulo de resiliência de misturas asfálticas – Método de ensaio**. Brasília, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Norma DNIT 136/2018 – ME: **Pavimentos flexíveis – Ensaio de fadiga em misturas asfálticas – Método de ensaio**. Brasília, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Norma DNIT 183/2018 – ME: **Pavimentos flexíveis – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Brasília, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Norma DNIT 184/2018 – ME: **Pavimentos flexíveis – Misturas asfálticas –**

Ensaio de fadiga em corpos de prova cilíndricos pelo equipamento AMPT – Método de ensaio. Brasília, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Norma DNIT 416/2019 – ME: **Pavimentos flexíveis – Determinação da rigidez complexa e ângulo de fase em misturas asfálticas pelo reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) – Método de ensaio.** Brasília, 2019.

DI BENEDETTO, H. *et al.* Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, v. 37, n. 3, p. 202–216, 2004.

DING, X. *et al.* Fracture modeling of rubber-modified binder based on Discrete Element Method. *Journal of Cleaner Production*, v. 380, p. 135017, 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Algodão: o produtor pergunta, a Embrapa responde.** Editado por Napoleão Esberard de Macêdo Beltrão e Alderi Emídio de Araújo. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. ISBN 85-7383-278-9.

FACCIN, C. *et al.* Mapas de grau de desempenho (PG) de ligantes asfálticos para o Brasil. In: **35 Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET.** Online: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. 2021. p. 933-943.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA. **Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method.** Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2001.

GARCÍA, Á. Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel*, v. 93, p. 264–272, 2012.

GARCÍA, Á.; SCHLANGEN, E.; VAN DE VEN, M.; SIERRA-BELTRAN, G. Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, v. 184, n. 1, p. 603–611, 2010.

GARCIA, A.; JELFS, J.; AUSTIN, C. J. Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules. *Construction and Building Materials*, v. 101, p. 309–316, 2015.

GÓMEZ MEIJIDE, B. *et al.* Effect of bitumen properties in the induction healing capacity of asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, v. 190, p. 131–139, 2018.

GRANGEIRO DE BARROS, A.; FIGUEIRÊDO LOPES LUCENA, L. C.; GARCÍA HERNANDEZ, Á. Addition of encapsulated soybean oil and waste cooking oil in asphalt mixtures: Effects on mechanical properties and self-healing of fatigue damage. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 34, n. 4, p. 04022002, 2022.

GRENFELL, J. Fatigue Testing of Asphalt Mixtures. Gramado. Palestra ministrada na **42ª Reunião Anual de Pavimentação**, nov. 2013.

GROSSEGGER, D.; GARCIA, A. Influence of the thermal expansion of bitumen on asphalt self-healing. *Applied Thermal Engineering*, v. 156, p. 23–33, 2019.

HASHIM, T. M. *et al.* Evaluating Rutting Resistance of Rejuvenated Recycled Hot-Mix Asphalt Mixtures Using Different Types of Recycling Agents. *Materials*, v. 15, n. 24, p. 8769, 2022.

HUGENER, M.; PARTL, M. N.; MORANT, M. Cold asphalt recycling with 100% reclaimed asphalt pavement and vegetable oil-based rejuvenators. *Road Materials and Pavement Design*, v. 15, n. 2, p. 239–258, 2014.

INOZEMTCEV, S.; KOROLEV, E.; DO, T. Choice of Healing Agent for Self-Healing Asphalt Concrete. *Materials*, v. 16, p. 7542, 2023.

JAHANGIRI, B. *et al.* Performance Evaluation of Asphalt Mixtures with Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Missouri. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2673, n. 2, p. 392–403, 2019.

KIM, Y. H.; WOOL, R. P. A theory of healing at a polymer-polymer interface. *Macromolecules*, v. 16, n. 7, p. 1115–1120, 1983.

KIM, Y. R.; LITTLE, D. N. One-Dimensional constitutive modeling of asphalt concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 116, n. 4, p. 751–772, 1990.

KUMAR, D. Pavement design using bituminous surface course with recycled aggregates. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 1280, p. 012047, 2023.

LI, B. *et al.* Investigation of Self-Healing Performance of Asphalt Mastic—From the Perspective of Secondary Aging. *Materials*, v. 16, p. 7567, 2023.

LI, L.; GAO, Y.; ZHANG, Y. Crack length based healing characterisation of bitumen at different levels of cracking damage. *Journal of Cleaner Production*, v. 258, p. 120709, 2020.

LIAO, C.-Y. *et al.* Recent Advances of Self-Healing Materials for Civil Engineering: Models and Simulations. *Buildings*, v. 14, p. 961, 2024.

LOUREIRO, T. G. **Estudo da evolução do dano por fadiga em misturas asfálticas**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

MELO NETO, O. D. **Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja**. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

MICAELO, R.; AL-MANSOORI, T.; GARCIA, A. Study of the mechanical properties and self-healing ability of asphalt mixture containing calcium-alginate capsules. *Construction and Building Materials*, v. 123, p. 734–744, 2016.

MOCELIN, D. **Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

MULLAPUDI, R. S.; NOOJILLA, S. L. A.; KUSAM, S. R. Effect of initial damage on healing characteristics of bituminous mixtures containing reclaimed asphalt material (RAP). *Construction and Building Materials*, v. 262, p. 120808, 2020.

MULLAPUDI, R. S.; CHOWDHURY, P. S.; KUSAM, S. R. Evaluation of Fatigue Damage and Healing Capability of RAP Mixtures Using Time Lag: An ITSM Test Parameter. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 16, n. 5, p. 1168–1180, 2023.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM – NCHRP. Report 648: **The Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – A Manual of Practice**. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2010.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J. *et al.* Influence of encapsulated sunflower oil on the mechanical and self-healing properties of dense-graded asphalt mixtures. *Materials and Structures*, v. 52, 2019.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GONZALEZ-TORRE, I. Influence of the Microwave Heating Time on the Self-Healing Properties of Asphalt Mixtures. *Applied Sciences*, v. 7, n. 10, p. 1076, 2017.

OLIVEIRA, J. *et al.* Fundamentos de mecânica do dano e de viscoelasticidade para prever desempenho de misturas asfálticas quanto à fadiga. *Transportes*, v. 31, p. e2745, 2023.

PIVETTA, F. D. C. **Análise de regeneração em misturas asfálticas através da mecânica do dano contínuo**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

QIU, J. *et al.* Evaluating Self Healing Capability of Bituminous Mastics. *Experimental Mechanics*, v. 52, n. 8, p. 1163–1171, 2012.

QIU, J.; VAN DE VEN, M.; MOLENAAR, A. Crack-Healing Investigation in Bituminous Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. 7, p. 864–870, 2013.

- SABOURI, M.; KIM, Y. R. Development of a Failure Criterion for Asphalt Mixtures under Different Modes of Fatigue Loading. *Transportation Research Record*, v. 2447, n. 1, p. 117–125, 2014.
- SALIM, N.; JONI, H.; AL-RUBAEE, R. Effect of asphalt modified with waste engine oil on the durability properties of hot asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement. *Open Engineering*, v. 14, 2024.
- SILVA, I. M. *et al.* Enhancing Asphalt Pavement Durability: Evaluation of Encapsulated Soybean Sludge Rejuvenators for Self-Healing and Cracking Resistance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 37, n. 3, p. 04024549, 2025.
- SUN, D. *et al.* Intrinsic temperature sensitive self-healing character of asphalt binders based on molecular dynamics simulations. *Fuel*, v. 211, p. 609–620, 2018.
- SUN, G. *et al.* Decay pattern of self-healing temperature susceptibility of bitumens at various ageing states. *Construction and Building Materials*, v. 324, p. 126668, 2022.
- TABAKOVIĆ, Amir; SCHLANGEN, Erik. Self-healing technology for asphalt pavements. *Self-healing materials*, p. 285-306, 2016.
- TORRES, P. R. B. *et al.* Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual. *Transportes*, v. 30, n. 1, p. 2585–2585, 2022.
- TRAN, N. H.; TAYLOR, A.; WILLIS, R. **Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents.** 2012. Relatório Técnico. Auburn University, Alabama, 2012.
- UNDERWOOD, B. S. Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis. *Transportation Research Record*, v. 2296, n. 1, p. 36–45, 2012.
- WANG, Y. D.; UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. Development of a fatigue index parameter, Sapp, for asphalt mixes using viscoelastic continuum damage theory. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 23, n. 2, p. 438–452, 2022.
- WOOL, R. P.; O'CONNOR, K. M. A theory crack healing in polymers. *Journal of Applied Physics*, v. 52, n. 10, p. 5953–5963, 1981.
- WU, D. Y.; MEURE, S.; SOLOMON, D. Self-healing polymeric materials: A review of recent developments. *Progress in Polymer Science*, v. 33, n. 5, p. 479–522, 2008.
- XIANG, H. *et al.* Healing behavior of thermo-oxygen aged asphalt based on molecular dynamics simulations. *Construction and Building Materials*, v. 349, p. 128740, 2022.

XU, S. *et al.* Self-Healing Asphalt Review: From Idea to Practice. *Advanced Materials Interfaces*, v. 5, n. 17, p. 1800536, 2018.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2370, n. 1, p. 17–25, 2013.

ZGHOUNDI, Y. *et al.* Self-healing Microencapsulation Technology for Asphalt Pavements: A Review. *Materials*, v. 16, p. 7542, 2023.

ZHANG, H.; QUAN, W.; WANG, R. Study on crack resistance of self-healing microcapsules in asphalt pavement by multi-scale method. *PLoS ONE*, v. 19, 2024.

ZHANG, S. *et al.* Influence of rock asphalt on self-healing behavior of asphalt mastics. *Construction and Building Materials*, v. 310, p. 124851, 2021.

ZHAO, K.; WANG, W.; WANG, L. Fatigue damage evolution and self-healing performance of asphalt materials under different influence factors and damage degrees. *International Journal of Fatigue*, v. 171, p. 107577, 2023.

ZHOU, Z. *et al.* Cracking Resistance Characterization of Asphalt Concrete Containing Reclaimed Asphalt Pavement at Intermediate Temperatures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2633, n. 1, p. 46–57, 2017.

ZHOU, L. *et al.* Evaluation of the adhesion and healing properties of modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, v. 251, p. 119026, 2020.

ZIARI, H. *et al.* The effect of rejuvenators on the aging resistance of recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 224, p. 89–98, 2019.