



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

MARIA ELOÍSA BARBOSA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTORREGENERAÇÃO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS RECICLADAS COM LÍQUIDO DA CASTANHA DO CAJU**

Campina Grande – PB

2026

MARIA ELOÍSA BARBOSA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTORREGENERAÇÃO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS RECICLADAS COM LÍQUIDO DA CASTANHA DO CAJU**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, como requisito obrigatório para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental

Área de concentração: Geotecnia

Orientadores:

Prof^ª. Dr^ª. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes
Lucena

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes
Lucena

Campina Grande – PB

2026

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Sistema de Bibliotecas - SISTEMOTECA
Catalogação de Publicação na Fonte. UFCG - Biblioteca Central

S586a

Silva, Maria Eloísa Barbosa da.

Avaliação da capacidade de autorregeneração em misturas asfálticas recicladas com líquido da castanha do caju / Maria Eloísa Barbosa da Silva. – 2026.

134 f. : il. color.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2026.

“Orientação: Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena, Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena”.

Referências.

1. Autorregeneração. 2. Misturas Asfálticas. 3. Microfissuras. 4. Dano por Umidade. 5. Cápsulas de Óleo da Castanha do Caju. 6. Ligante Asfáltico. I. Lucena, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes. II. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. III. Título.

UFCG/BC

CDU 624(043.3)

MARIA ELOÍSA BARBOSA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTORREGENERAÇÃO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS RECICLADAS COM LÍQUIDO DA CASTANHA DO CAJU**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da
Universidade Federal de Campina Grande,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestra em Engenharia Civil e
Ambiental, área de concentração Geotecnia,
linha de pesquisa Mecânica e Gerência de
Pavimentos.

Dissertação aprovada em: / / .

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena – UFCG
(Coorientador)

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues– UFCG
(Membro Interno)

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito, PhD – UFRGS
(Membro Externo)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

ALUNO(A): MARIA ELOÍSA BARBOSA DA SILVA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIRÊDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR. ADRIANO ELISIO DE FIGUEIRÊDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG - COORIENTADOR, DR. JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES - UFCG - EXAMINADOR INTERNO, DR. LÉLIO ANTÔNIO TEIXEIRA BRITO - UFRS - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 02/2026)/ TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTORREGENERAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM LÍQUIDO DA CASTANHA DO CAJU" / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 08:30 HORAS / NA SALA DE REUNIÃO DO BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, DE FORMA HÍBRIDA.

2. EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA", SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE "APROVADO". NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, ISABELLY CRISTINNY GOMES GAUDÊNCIO, SECRETÁRIA, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.

3. **CAMPINA GRANDE, 26 DE FEVEREIRO DE 2026.**



Documento assinado eletronicamente por **Maria Eloísa Barbosa da Silva, Usuário Externo**, em 27/02/2026, às 11:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ISABELLY CRISTINNY GOMES GAUDENCIO, ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO**, em 27/02/2026, às 11:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/02/2026, às 11:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/02/2026, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lélio Antônio Teixeira Brito, Usuário Externo**, em 27/02/2026, às 15:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, PROFESSOR**, em 01/03/2026, às 11:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **6285492** e o código CRC **1EB16334**.

DEDICATÓRIA

Dedico a minha avó Maria (*in memoriam*), de quem que herdei mais que o nome: herdei a fé, a coragem e a força para continuar. Tudo o que eu vencer terá sempre um pedaço de você.

“Na minha busca, no meu amor e no meu caminho.”

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho, sejam mencionados aqui ou não.

A Deus, por me conceder força e sabedoria para vencer os obstáculos da vida, sustentando minha fé e renovando minha esperança nos dias difíceis. À Imaculada Conceição, por sua intercessão e proteção sob seu manto cuidadoso. Sua graça e bondade me ampararam e não me permitiram desistir.

Aos meus pais, Maria e José, por todo amor, apoio e cuidado dedicados a mim. Pelos sacrifícios realizados na criação e educação de seus filhos, que me possibilitaram trilhar caminhos até então inacessíveis. Sem vocês, nada disso seria possível.

À minha avó, Maria (in memoriam), exemplo de força e superação. Sua coragem me impulsiona quando o medo tenta me parar, e sua determinação me lembra que, muitas vezes, viver é apenas dar mais um passo. Se hoje consigo seguir adiante, é porque sua presença permanece viva em mim, para sempre.

À minha irmã querida, Luana, por ser sinônimo de alegria e amor em minha vida, sempre pronta a ouvir e se fazer presente, mesmo à distância. Aos meus irmãos, Marcelo e Thiago, por celebrarem cada conquista deste sonho junto comigo.

Aos meus sobrinhos amados, Isabelle e Bernardo, por iluminarem meus dias com seus sorrisos, e a toda a minha família, pelo carinho, amor e incentivo constantes.

À professora Lêda Lucena, cuja paciência e sabedoria foram fundamentais para minha formação profissional. Sou profundamente grata por acreditar em meu potencial e por me desafiar a ir além.

Ao professor Adriano Elísio, que me acompanha desde a iniciação científica, pelo incentivo, dedicação e orientação ao longo dos anos.

Aos amigos do LEP, em especial Adla, Rakel, Lara, Alisson, Thiago, Leonardo, Arthur, Ladjane, Allan e Daniel, pela amizade, apoio e por tornarem os dias no laboratório mais leves e alegres.

Aos funcionários do LEP, Arthur, Jadilson e Joseildo, pelo auxílio constante e pela parceria durante o dia a dia no laboratório.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), por fornecer os meios necessários à realização desta pesquisa.

À Onvit, pela doação do líquido da castanha do caju, fundamental para as análises deste estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), por viabilizarem o curso de mestrado.

“Não tenha medo, pois eu estou com você. Não precisa olhar com desconfiança, pois eu sou o seu Deus. Eu fortaleço você, eu o ajudo e o sustento com minha direita vitoriosa.”

Isaías 41:10

RESUMO

A incorporação do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) em novas misturas apresenta uma alternativa sustentável a destinação final deste subproduto, mas a presença de ligante envelhecido pode comprometer sua resistência à fadiga, tornando a mistura mais rígida. A adição de agentes rejuvenescedores encapsulados permite recuperar, parcialmente, as propriedades químicas e reológicas do ligante asfáltico, intensificando seu processo de autorregeneração, que permite recuperar os danos parcialmente desenvolvidos em sua estrutura ao longo do tempo. O líquido da castanha do caju (LCC), subproduto do beneficiamento da amêndoa do caju, apresenta características surfactantes que favorecem a compatibilização de ligantes asfálticos, contribuindo para a economia circular ao gerar uma nova cadeia de uso. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas com LCC encapsulado. O estudo foi desenvolvido em seis etapas: (1) caracterização física e reológica dos materiais; (2) caracterização físico-química e térmica das cápsulas; (3) Dosagem das misturas asfálticas pelo método SUPERPAVE, contemplando uma mistura de referência (sem RAP), uma mistura com 20% de RAP e duas misturas com 20% de RAP e adição de 0,5% de cápsulas (em massa total da mistura), contendo razões óleo/água de 0,15 e 0,20; (4) avaliação das propriedades mecânicas pelos ensaios de resistência à tração diametral, dano por umidade, módulo de resiliência e deformação permanente; (5) análise do comportamento viscoelástico (módulo dinâmico) e fadiga à tração direta das misturas asfálticas via modelo S-VECD; e (6) protocolo com períodos de repouso para avaliação do fenômeno da autorregeneração. Os resultados indicaram que o teor de cápsulas adicionado, não alterou o volume de vazios das misturas recicladas. Do ponto de vista mecânico, a incorporação do óleo encapsulado contribuiu para a redução da rigidez da mistura com RAP. No protocolo de autorregeneração, as misturas com cápsulas apresentaram índice de regeneração de 39%, superior ao da mistura com RAP (36%), porém inferior ao da mistura de referência (41%). De modo geral, os resultados demonstram que o LCC encapsulado possui potencial como agente rejuvenescedor, promovendo alterações no comportamento dano das misturas recicladas nas curvas de integridade *versus* dano.

Palavras-chave: autorregeneração; microfissuras; dano; cápsulas.

ABSTRACT

The incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) into new mixtures presents a sustainable alternative for the final disposal of this by-product, but the presence of aged binder can compromise its fatigue resistance, making the mixture more rigid. The addition of encapsulated rejuvenating agents allows for partial recovery of the chemical and rheological properties of the asphalt binder, intensifying its self-regeneration process, which allows for the recovery of damage partially developed in its structure over time. Cashew nut shell liquid (CNSL), a by-product of cashew nut processing, has surfactant characteristics that favor the compatibility of asphalt binders, contributing to the circular economy by generating a new use chain. The objective of this research was to evaluate the self-regenerative performance of recycled asphalt mixtures with encapsulated CNSL. The study was developed in six stages: (1) physical and rheological characterization of the materials; (2) physicochemical and thermal characterization of the capsules; (3) Dosage of asphalt mixtures using the SUPERPAVE method, including a reference mixture (without RAP), a mixture with 20% RAP, and two mixtures with 20% RAP and the addition of 0.5% capsules (by total mixture mass), containing oil/water ratios of 0.15 and 0.20; (4) evaluation of mechanical properties by diametral tensile strength, moisture damage, resilient modulus, and permanent deformation tests; (5) analysis of viscoelastic behavior (dynamic modulus) and direct tensile fatigue of the asphalt mixtures via the S-VECD model; and (6) protocol with compensation periods for evaluating the self-healing characteristics. The results indicated that the content of added capsules did not alter the void volume of the recycled mixtures. From a mechanical point of view, the incorporation of encapsulated oil contributed to the reduction of stress in the mixture with RAP. In the self-healing protocol, the mixtures with capsules showed a regeneration rate of 39%, higher than that of the mixture with RAP (36%), but lower than that of the reference mixture (41%). Overall, the results demonstrate that encapsulated LCC has potential as a rejuvenating agent, promoting changes in the damage behavior of the recycled mixtures in the integrity versus damage curves.

Keywords: healing; microcracks; damage; capsules.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diferentes configurações de ensaios de fadiga.	35
Figura 2: Representação das tensões no centro de um CP no ensaio de fadiga.....	36
Figura 3: Configuração do ensaio de flexão em viga quatro pontos.	36
Figura 4: Equipamento ensaio de fadiga a tração-compressão.	38
Figura 5: Hipótese do processo de fechamento de trincas.	39
Figura 6: Mecanismo de cura em três etapas no asfalto.	40
Figura 7: Estágios de regeneração.	42
Figura 8: Técnicas de mensuração do healing em mesoescala: (a) Microscopia de fluorescência do processo de autorregeneração de um ligante asfáltico modificado por SBS; (b) Tomografia computadorizada de uma amostra de ligante asfáltico após aquecimento, seguido de diversos períodos de repouso.	43
Figura 9: Ilustração conceitual do processo de rompimento das cápsulas.	48
Figura 10: Curva característica de dano	53
Figura 11: Resultado da aplicação de períodos de repouso em mistura asfáltica representados no espaço C vs N para fins de avaliação de <i>healing</i>	56
Figura 12: Curva característica de dano com inclusão de períodos de repouso de 270 s, na temperatura de 30° C.	57
Figura 13: Fluxograma da pesquisa.	58
Figura 14: Viscosidade do ligante virgem antes e após RTFO.	61
Figura 15: Distribuição granulométrica dos agregados virgens.	62
Figura 16: Distribuição granulométrica do White RAP e Black RAP.	64
Figura 17: Fluxograma do processo de microencapsulamento	66
Figura 18: Diâmetro equivalentes das cápsulas.	68
Figura 19: Resistência de pico média das cápsulas.	69
Figura 20: Espectros de FTIR para as cápsulas com líquido da castanha do caju	70
Figura 21: Curva TGA e DTA versus temperatura da cápsula (0,15).	72
Figura 22: Curva TGA e DTA versus temperatura da cápsula (0,20).	72
Figura 23: Fluxograma da dosagem SUPERPAVE	74
Figura 24: Faixas granulométricas adotadas na dosagem SUPERPAVE	74
Figura 25: <i>Blend chart</i> para a mistura reciclada.	77
Figura 26: Faixas granulométricas adotadas para a mistura reciclada.	77
Figura 27: Volume de vazios das misturas asfálticas sem e com cápsulas.	80

Figura 28: Resistência à tração direta por compressão diametral.	89
Figura 29: Resistência retida à tração indireta das misturas asfálticas.....	92
Figura 30: Módulo de resiliência das misturas asfálticas.	94
Figura 31: Deformação permanente das misturas asfálticas.	96
Figura 32: Curvas mestras das misturas asfálticas na temperatura de referência.....	100
Figura 33: Curvas mestras de ângulo de fase das misturas asfálticas	100
Figura 34: Módulo dinâmico e ângulo de fase versus número de ciclos do ensaio de fadiga.	103
Figura 35: Curva característica de dano das misturas na temperatura de 25°C da mistura REF.	104
Figura 36: Curva característica de dano das misturas na temperatura de 25°C da mistura RAP.....	104
Figura 37: Curva característica de dano das misturas na temperatura de 25°C da mistura RAP C1.....	105
Figura 38: Curva característica de dano das misturas na temperatura de 25°C da mistura RAP C2.....	105
Figura 39: Curvas características de dano ajustadas de todas as misturas estudadas para a temperatura de 25°C.	106
Figura 40: Envoltórias de ruptura baseadas no G^R das misturas estudadas.....	108
Figura 41: Simulação da vida de fadiga a partir do critério de ruptura G^R	108
Figura 42: Fator de Fadiga das Misturas (FFM) a 25°C.....	109
Figura 43: Curva característica de dano com inclusão de períodos de repouso de 270 a 25° C da mistura REF.	111
Figura 44: Curva característica de dano com inclusão de períodos de repouso de 270 a 25° C da mistura RAP.....	111
Figura 45: Curva característica de dano com inclusão de períodos de repouso de 270 a 25° C da mistura RAP C1.	112
Figura 46: Curva característica de dano com inclusão de períodos de repouso de 270 a 25° C da mistura RAP C2.	112
Figura 47: Potencial de healing em função da integridade.....	115
Figura 48: Resultados dos ensaios cíclicos - prolongamento na vida de fadiga com e sem períodos de repouso das misturas asfálticas.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Componentes fenólicos do LCC natural e técnico.....	31
Tabela 2: Caracterização física e reológica do ligante asfáltico virgem antes e após RTFO	60
Tabela 3: Ensaios para caracterização dos agregados.	62
Tabela 4: Caracterização física e reológica do ligante asfáltico envelhecido antes e após RTFO	63
Tabela 5: Caracterização do RAP.	64
Tabela 6: Viscosidade do líquido da castanha do caju.....	65
Tabela 7: Propriedades físico-químicas do LCC	65
Tabela 8: Proporções utilizadas na formação das cápsulas.	67
Tabela 9: Porcentagem de agregados.....	75
Tabela 10: Parâmetros volumétricos das misturas tentativas	75
Tabela 11: Parâmetro volumétricos da mistura com teor de ligante ótimo.	76
Tabela 12: Percentuais em massa da mistura asfáltica.	76
Tabela 13: temperatura crítica dos ligantes virgem e envelhecido.	76
Tabela 14: Percentuais em massa das misturas asfálticas.....	78
Tabela 15: Parâmetros volumétricos da mistura reciclada.	78
Tabela 16: Percentuais em massa da mistura asfáltica reciclada.	78
Tabela 17: Períodos de repouso reduzidos nas condições de ensaio.	88
Tabela 18: Resultado do teste Tukey para comparação múltipla das médias dos valores de resistência à tração das misturas.....	90
Tabela 19: Resultado do teste Tukey para comparação múltipla das médias dos valores de resistência ao dano por umidade das misturas.....	93
Tabela 20: Resultado do teste Tukey para comparação múltipla das médias dos valores de módulo de resiliência das misturas asfálticas.	95
Tabela 21: Resultado do teste Tukey para comparação múltipla das médias dos valores de deformação permanente a das misturas asfálticas.	98
Tabela 22: Coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal utilizado para determinação do módulo dinâmico.	99
Tabela 23: Coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal utilizado para determinação do módulo de armazenamento.....	102

Tabela 24: Tempos de relaxação (ρ_i) e módulos do elemento de Maxwell (E_i) para as séries de Prony.....	102
Tabela 25: Taxa de crescimento do dano das misturas asfálticas.	103
Tabela 26: Parâmetros de ajuste da função potência C_{11} e C_{12} , coeficientes de regressão do critério G_R , critério D_R e valor de S_{app}	108
Tabela 27: Resultados de índice de regeneração das misturas asfálticas.	113
Tabela 28: Análise comparativa das misturas recicladas.	116

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Ensaios de caracterização do ligante asfáltico.....	59
Quadro 2: Identificação das misturas utilizadas	79

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMPT - Asphalt Mixture Performance Tester
ASTM – American Society for Testing Materials
C – Integridade
CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS – Compactador Giratório SUPERPAVE
CP - Corpo de Prova
CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CT-Scan – Computed Tomography Scan (Tomografia Computadorizada)
DMR – Dynamic Modulus Ratio
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FFM – Fator de Fadiga da Mistura
FN – Flow Number
FTIR – Fourier Transform Infrared
Jnr – Compliâncias não-recuperáveis
Gmb – Massa Específica Aparente Estimada
Gmm – Densidade Máxima da Mistura
LEP – Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDT – Linear Variable Differential Transformers
LVE – Comportamento Linear Viscoelástico
MD – Módulo Dinâmico
MR – Módulo de Resiliência
MSCR – Multiple Stress Creep Recovery
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
PG – Performance Graded Asphalt Binder
PB – Paraíba
PR – Período de repouso
RAP - Reclaimed Asphalt Pavement (Pavimento Asfáltico Reciclado)
RAP C1 – Mistura reciclada com cápsulas MC1
RAP C2 – Mistura reciclada com cápsulas MC2
REF – Mistura de referência

RBV – Relação Betume x Vazios
RRT – Resistência Retida à Tração
RT – Resistência à Tração por Compressão Diametral
RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test
S – Acúmulo de dano no modelo S-VECD
SUPERPAVE – Superior Performing Pavements
S-VECD – Simplified Viscoelastic Continuum Damage
TGA – Termogravimetric Analysis (Análise Termogravimétrica)
UFCG – Universidade Federal de Campina Grande
VAM – Vazios do Agregado Mineral
Vv – Volume de Vazios

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	22
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	24
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
1.3.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	24
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1.	MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS	26
2.2.	AGENTES REJUVENESCEDORES	28
2.3.	LÍQUIDO DA CASTANHA DO CAJU (LCC) COMO AGENTE REJUVENESCEDOR	30
2.4.	DANO POR FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS	33
2.4.1.	Ensaio de fadiga em misturas asfálticas.....	34
2.5.	AUTORREGENERAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....	38
2.5.1.	Fatores que influenciam a autorregeneração	44
2.5.2.	Autorregeneração em misturas asfálticas recicladas	45
2.6.	ALTERNATIVAS PARA INTENSIFICAÇÃO DA AUTOREGENERAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	47
2.6.1.	Aquecimento por indução.....	47
2.6.2.	Agentes rejuvenescedores encapsulados	48
2.7.	MODELO VISCOELÁSTICO DE DANO CONTÍNUO SIMPLIFICADO (S-VECD).....	50
2.8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
3.	METODOLOGIA.....	58
3.1.	MATERIAIS.....	59
3.1.1.	Ligante asfáltico	59
3.1.2.	Agregados virgens	61

3.1.3.	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i> – RAP.....	62
3.1.4.	Líquido da castanha do caju (LCC).....	65
3.2.	CONFECCÃO DAS CÁPSULAS	66
3.2.1.	Diâmetro das cápsulas	67
3.2.2.	Resistência à compressão das cápsulas	68
3.2.3.	Caracterização químicas das cápsulas	70
3.2.4.	Propriedades térmicas das cápsulas	71
3.3.	MÉTODOS	73
3.3.1.	Dosagem SUPERPAVE	73
3.4.	ADIÇÃO DAS CÁPSULAS À MISTURA	79
3.5.	AVALIAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS	80
3.5.1.	Resistência à tração por compressão diametral (RT).....	80
3.5.2.	Dano por umidade induzida.....	81
3.5.3.	Módulo de resiliência (MR)	82
3.5.4.	Resistência à deformação permanente – Flow Number (FN).....	82
3.5.5.	Módulo dinâmico (MD)	83
3.5.6.	Fadiga à tração direta uniaxial.....	83
3.6.	MENSURAÇÃO DA AUTORREGENERAÇÃO	84
3.6.1.	Aplicação do modelo S-VECD.....	84
3.6.2.	Protocolo <i>Healing</i>	87
4.	RESULTADOS.....	89
4.1.	AVALIAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS	89
4.1.1.	Resistência à tração por compressão diametral (RT).....	89
4.1.2.	Dano por umidade induzida.....	91
4.1.3.	Módulo de Resiliência (MR)	94
4.1.4.	Deformação permanente (<i>Flow Number</i>)	96

4.1.5.	Módulo dinâmico.....	99
4.1.6.	Fadiga à tração direta.....	103
4.1.7.	Mensuração do <i>healing</i>	110
4.1.8.	Análise comparativa do desempenho das misturas recicladas	116
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	117
5.1.	Conclusões.....	117
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros	118
6.	REFERÊNCIAS	120

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O incentivo à utilização dos resíduos gerados nos serviços de pavimentação, especialmente na produção de novas misturas asfálticas, tem sido apontado como uma estratégia promissora para a redução de custos e impactos ambientais (Vandewalle *et al.*, 2020). Nesse contexto, o uso do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), material obtido a partir da fresagem ou remoção de camadas deterioradas do revestimento asfáltico, representa uma alternativa capaz de reduzir o consumo de materiais virgens, incluindo agregados e ligante asfáltico. Além disso, sua aplicação pode contribuir para a mitigação de impactos ambientais associados às atividades de extração de materiais naturais, reabilitação de pavimentos e disposição final de resíduos. Contudo, os ganhos em sustentabilidade dependem de fatores como o teor de RAP incorporado, o estado de envelhecimento do ligante, as estratégias de dosagem e o desempenho à longo prazo das misturas asfálticas (Zhou *et al.*, 2019).

A presença do ligante envelhecido confere à mistura maior rigidez, resistência à tração, módulo de resiliência e resistência à deformação permanente, em função do processo de oxidação ao longo da vida útil do pavimento (Oliveira *et al.*, 2022). No entanto, essa maior rigidez também pode elevar a suscetibilidade à fissuração sob solicitações repetidas de tráfego. O dano por fadiga manifesta-se inicialmente por meio do surgimento de microfissuras, que, quando não recuperadas, tendem a evoluir para macrofissuras, reduzindo a vida útil do pavimento (Mullapudi *et al.*, 2020).

A autorregeneração (*self-healing*) refere-se à capacidade do ligante asfáltico recuperar parte dos danos, como microfissuras e perda de integridade, por meio de processos difusivos e viscoelásticos que promovem a redistribuição de tensões e o fechamento parcial dessas discontinuidades durante períodos de repousos (Jwaida *et al.*, 2024). Essa propriedade permite que o material repare automaticamente parte dos danos durante o uso, restaurando parcial ou totalmente seu desempenho (Wang e Hao, 2021). Entretanto, ainda existem lacunas no entendimento da interação entre o RAP e os mecanismos de

autorregeneração, especialmente no que se refere à influência do ligante envelhecido na capacidade de recuperação das misturas asfálticas (Mullapudi *et al.*, 2020).

Um dos principais mecanismos de regeneração é a incorporação de materiais rejuvenescedores, em forma de microcápsulas ou fibras, capazes de liberar esses agentes em resposta aos danos (Li, Hao e Li, 2022; Wang, 2021; Shu *et al.* 2019). O encapsulamento de agentes rejuvenescedores tem sido amplamente investigado como uma estratégia para potencializar a autorregeneração de misturas asfálticas (Jwaida *et al.*, 2024). Esses agentes devem atuar na restauração da fração maltenos do ligante asfáltico, perdida devido ao envelhecimento, além de melhorar o desempenho global das misturas asfálticas (Salim, Joni, Alrubae, 2024; Caputo *et al.*, 2019). Nesse contexto, bio-óleos de origem vegetal têm se destacado como alternativas sustentáveis, dentre os quais se insere o líquido da casca da castanha de caju (LCC).

O líquido da castanha do caju (LCC) é um subproduto de baixo custo do beneficiamento da castanha do caju e constitui um recurso renovável, sendo reconhecido como um material ecológico, sustentável e economicamente viável (Barbosa *et al.*, 2019; Gonçalves *et al.*, 2018). Em função de sua composição química rica em compostos fenólicos, o LCC apresenta atividade antioxidante e caráter surfactante, indicando potencial para reduzir os efeitos do envelhecimento oxidativo e melhorar a estabilidade do ligante asfáltico (Fernandes, 2011). No contexto das pesquisas em misturas asfálticas, observa-se que o LCC técnico é o tipo mais comumente utilizado, especialmente em estudos voltados à modificação de ligantes asfálticos.

A mensuração da capacidade regenerativa (*healing*) das misturas asfálticas pode ser realizada por meio do modelo viscoelástico linear de dano contínuo simplificado (S-VECD), o qual permite analisar o comportamento regenerativo de misturas asfálticas após períodos de repouso em um estado específico de dano (Pivetta *et al.*, 2020). Essa abordagem possibilita integrar os efeitos do tempo, temperatura e ciclos de repouso, configurando-se como uma ferramenta de previsão do comportamento à fadiga e do potencial de *healing* das misturas asfálticas. Estudos prévios demonstram sua aplicabilidade em diferentes contextos, como na avaliação de misturas contendo agentes

rejuvenescedores à base de óleo (Nardo *et al.*, 2023) e em misturas asfálticas modificadas por polímeros (Queiroz *et al.*, 2023).

Diante desse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da adição de cápsulas contendo o líquido da castanha do caju (LCC), como agente rejuvenescedor, sobre os mecanismos de dano e a capacidade de autorregeneração de misturas asfálticas recicladas.

1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas com 20% de RAP com líquido de castanha de caju (LCC) como agente rejuvenescedor encapsulado.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento mecânico através dos ensaios de resistência à tração diametral, dano por umidade, módulo de resiliência e deformação permanente das misturas asfálticas recicladas com o líquido da castanha do caju (LCC) encapsulado;
- Analisar o desempenho à fadiga das misturas asfálticas recicladas por meio do ensaio de tração direta uniaxial via protocolo S-VECD.
- Estudar a capacidade autorregenerativa da mistura asfáltica de referência e das misturas recicladas contendo as microcápsulas;

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Essa dissertação é composta por 5 capítulos, sendo apresentada a seguir uma breve descrição dos assuntos abordados em cada um deles.

- Capítulo 1: Introdução, apresentando o contexto do estudo, objetivo geral e objetivos específicos e a organização do trabalho;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica, com conceitos sobre misturas asfálticas recicladas, agentes rejuvenescedores, dano por fadiga, autorregeneração e o modelo S-VECD;

- Capítulo 3: Metodologia, detalhando os materiais utilizados, a confecção e caracterização das cápsulas, os procedimentos de ensaio e a avaliação da autorregeneração;
- Capítulo 4: Resultados e discussão, incluindo a análise do desempenho mecânico das misturas e da capacidade de regeneração;
- Capítulo 5: Conclusões e recomendações, sintetizando os principais achados, limitações do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos sobre misturas asfálticas recicladas, agentes rejuvenescedores e o uso do líquido da castanha do caju (LCC), além dos principais conceitos relacionados ao dano por fadiga, à autorregeneração e às estratégias de intensificação da regeneração. Por fim, é discutido o modelo S-VECD, que serve de base para a avaliação da capacidade de autorregeneração das misturas asfálticas estudadas.

2.1. MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

A reciclagem de pavimentos tem se consolidado como uma estratégia tecnicamente viável e ambientalmente favorável, ao permitir a reutilização de materiais provenientes de camadas asfálticas envelhecidas e deterioradas, conhecidos como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), aplicáveis tanto em obras de reabilitação quanto na construção de novas rodovias. A incorporação do RAP em novas misturas proporciona benefícios econômicos, associados à redução dos custos de construção, e ambientais, decorrentes da diminuição da demanda por recursos não renováveis, como agregados naturais e ligantes asfálticos. Além disso minimiza os riscos à saúde pública e problemas ambientais por conta da contaminação do solo associados ao descarte irregular desse material. (Chen *et al.*, 2020; Kumar, 2023).

No âmbito do desempenho estrutural, o uso do RAP em misturas asfálticas pode resultar em comportamento similar ou até superior a misturas produzidas com materiais virgens desde que sejam consideradas as particularidades do RAP, que englobam, por exemplo, heterogeneidade e presença de ligante envelhecido (Pleşcan, 2015; Luzzi, 2019).

O envelhecimento do ligante asfáltico aderido aos agregados do RAP é resultado dos processos de oxidação ocorridos ao longo da vida útil do pavimento. A incorporação desse material em novas misturas asfálticas influencia diretamente o desempenho das misturas recicladas, especialmente em função da interação entre o ligante virgem e o ligante

envelhecido presente no RAP. Nesse contexto, a literatura descreve três cenários distintos de interação: (i) o RAP atua apenas como agregado negro (*black rock*), quando não ocorre ativação do ligante envelhecido e, conseqüentemente, não há mistura com o ligante virgem; (ii) ocorre completa homogeneização, na qual os ligantes virgem e envelhecido se combinam de forma uniforme; e (iii) há ativação parcial, caracterizada por um grau variável de interação entre os dois ligantes no interior da mistura (Mangiafico, Sauzéat e Di Benedetto, 2019; Gaspar *et al.*, 2020; Abdalhameed e Abd, 2021; Rathore e Zaumanis, 2020).

Tran, Taylor e Willis (2012) destacam que o ligante envelhecido tende a aumentar a rigidez e a fragilidade das misturas asfálticas, devido às alterações químicas que ocorrem ao longo do tempo de exposição ao tráfego e intempéries, o que resulta em uma viscosidade mais alta e menor resistência à fissuração em curto e à longo prazo. Além disso, a variabilidade dos ligantes envelhecidos, influenciada por diferenças na origem do material, no histórico de envelhecimento e nos processos de recuperação, dificulta a padronização e controle do desempenho das misturas asfálticas recicladas.

O envelhecimento oxidativo ocorre devido à difusão de oxigênio no ligante asfáltico quando exposto à atmosfera (Liang *et al.*, 2019). Esse processo contribui para a redução da vida útil à fadiga dos pavimentos asfálticos, além de favorecer a fragilização e a deterioração progressiva da estrutura. Sob a ação de cargas cíclicas, microfissuras tendem a se desenvolver em camadas intermediárias de menor resistência das misturas asfálticas recicladas, evoluindo gradualmente e comprometendo o desempenho à fadiga do pavimento (Mullapudi, Aparna Noojilla & Reddy, 2020).

Para mitigar os efeitos do envelhecimento do ligante, que comprometem o desempenho mecânico e a durabilidade das misturas asfálticas recicladas, pesquisas (Xião *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2024; Elnaml *et al.*, 2024) tem estudado o uso de agentes rejuvenescedores para restaurar parcialmente as propriedades química e reológica do ligante envelhecido.

2.2. AGENTES REJUVENESCEDORES

Os agentes rejuvenescedores são materiais empregados com o objetivo de restaurar, de forma parcial, as propriedades físicas e químicas de ligantes asfálticos envelhecidos, por meio da reposição de componentes voláteis perdidos durante o processo de oxidação. Esses agentes atuam reduzindo a viscosidade e a rigidez do ligante envelhecido, recompondo frações leves, como maltenos e aromáticos, e restabelecendo o equilíbrio entre asfaltenos e maltenos. Como resultado, estes agentes promovem maior mobilidade do ligante, melhor interação com o ligante presente no RAP e a recuperação de propriedades como flexibilidade, adesividade e coesão, contribuindo para o aumento do desempenho e da durabilidade de misturas asfálticas recicladas.

Como consequência, observa-se a recuperação das propriedades reológicas do ligante asfáltico, refletida na redução da rigidez excessiva e na melhoria de seu comportamento viscoelástico, o que se traduz em aumento da resistência à deformação permanente e da vida de fadiga das misturas asfálticas, resultando em melhor desempenho e maior durabilidade do pavimento (Suzuki, 2019; Caputo *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2022).

Diante desse contexto, diferentes agentes rejuvenescedores têm sido empregados com o objetivo de restaurar as propriedades reológicas e químicas de ligantes asfálticos envelhecidos. Entre os tipos investigados na literatura, tem-se: óleo de soja, óleo de milho, óleo de gergelim, óleo de girassol, óleo de semente de algodão, óleo de linhaça e óleo de algodão e ácidos graxos provenientes da borra do óleo de soja (Tursi, 2019; De Medeiros Melo Neto *et al.*, 2022; Torres *et al.*, 2022; Darmawan & Aziz, 2021; Silva *et al.*, 2022; Costa *et al.*, 2025). De modo geral, esses materiais apresentam viabilidade técnica e econômica e são associados, na literatura, à redução do descarte inadequado de resíduos e à incorporação de princípios de economia circular no setor de pavimentação asfáltica (Wang *et al.*, 2021).

Zhang *et al.* (2019) investigaram o grau de autorregeneração do ligante asfáltico a partir da análise de grupos funcionais, verificando que a adição de regeneradores à base de óleos vegetais foi capaz de reverter os efeitos do envelhecimento, restabelecendo os níveis originais dos grupos carbonila e sulfóxido. Mansourkhaki *et al.* (2020) analisaram a relação entre a composição química e o comportamento reológico de ligantes asfálticos

contendo 25%, 50% e 100% de ligante proveniente de RAP, modificados com ligante virgem e com a adição de agente rejuvenescedor. Os resultados dos ensaios reológicos apresentaram correlação positiva com o teor de asfaltenos, indicando sua influência direta no desempenho do ligante. Ademais, os autores verificaram que a utilização de misturas com 100% de RAP é viável quando se emprega um agente rejuvenescedor à base de óleo.

Carvalho *et al.* (2024) avaliaram o efeito de aditivos WMA (óleo de girassol, WarmGrip® e zeólita natural) em misturas asfálticas com 30% e 70% de RAP. Os resultados mostraram ativação parcial do ligante do RAP, com aproximadamente 96% de ativação para 30% de RAP e 80% para 70% de RAP. Nas misturas com 30% de RAP, o óleo de girassol reduziu 22% da resistência à tração e 33% da rigidez da mistura, enquanto a zeólita natural provocou reduções de 10% na resistência à tração e 23% na rigidez. Para as misturas com 70% de RAP, as reduções na resistência à tração foram de 23% com óleo de girassol e 38% com zeólita. De modo geral, as misturas contendo até 30% de RAP com AR apresentaram desempenho mecânico superior ao da mistura de referência.

Costa *et al.* (2024) avaliaram o desempenho mecânico de misturas asfálticas com altos teores de RAP (50%, 75% e 100%) utilizando agentes de reciclagem orgânicos (óleo residual de motor) e surfactantes (ADCAP WM), submetidas a protocolos de envelhecimento de curto e longo prazo. Os autores observaram que o aumento do teor de RAP elevou a rigidez das misturas, mas comprometeu a resistência à fissuração, sendo viável a utilização de até 75% de RAP. A adição de agentes de reciclagem melhorou a trabalhabilidade e a homogeneização das misturas. Enquanto o óleo residual reduziu o desempenho com o aumento do teor, o ADCAP WM aumentou a capacidade de deformação, a resistência ao envelhecimento e à fissuração.

Melo Neto (2025) avaliou a utilização do óleo de babaçu como agente rejuvenescedor em misturas asfálticas com diferentes teores de RAP, evidenciando sua eficácia na redução da rigidez do ligante envelhecido. Os resultados mostraram que misturas com elevados teores de RAP e óleo de babaçu, especialmente a formulação com 70% de RAP e 7% de óleo, apresentaram desempenho mecânico equivalente ao da mistura de controle. Adicionalmente, o estudo indicou redução significativa nos custos de produção por

quilômetro de rodovia, variando de 18% a 73% para uma distância de transporte de 50 km e de 17% a 71% para 100 km, quando comparadas às misturas convencionais.

2.3. LÍQUIDO DA CASTANHA DO CAJU (LCC) COMO AGENTE REJUVENESCEDOR

O líquido da casca da castanha do caju (LCC), internacionalmente conhecido como *Cashew Nut Shell Liquid* (CNSL), é um líquido viscoso de cor marrom escuro, extraído da casca da amêndoa do caju. O CNSL é constituído por compostos fenólicos com um comprimento de cadeia substancialmente de 15 e 16 átomos de carbono, apresentando graus variados de insaturação e metasubstituição no anel fenólico. Trata-se de um subproduto de baixo custo do beneficiamento da castanha do caju e representa um recurso renovável, sendo considerado um material ecológico, sustentável e economicamente viável (Barbosa *et al.*, 2019; Gonçalves *et al.*; 2018; Abbina *et al.*, 2017; Mazzeto e Lomonaco, 2009) .

O LCC pode ser obtido por dois processos distintos: extração natural (LCC natural) e extração industrial (LCC industrial), conforme apresentado na Tabela 1. No processo industrial, o tratamento térmico utilizado, para a retirada da amêndoa, submete o LCC a elevadas temperaturas, promovendo a descarboxilação do ácido anacárdico e sua conversão em cardanol, alterando significativamente a composição química do material (Oliveira, 2014). De acordo com Mazzeto e Lomonaco (2009), o LCC técnico é obtido por meio do processo à quente com composição de 70-75% de cardanol, 15-20% de cardol, 10% de material polimérico e traços de 2- metilcardol que conferem propriedades surfactantes e antioxidantes.

Em função de sua natureza química, o LCC apresenta também características surfactantes que podem contribuir para a compatibilização de ligantes asfálticos. O LCC é solúvel tanto em solventes de polaridade mediana quanto nos apolares, podendo ser utilizado em misturas com o petróleo e seus derivados (Lide, 1996).

Tabela 1: Componentes fenólicos do LCC natural e técnico.

Componentes	LCC natural (%)	LCC industrial (%)
Ácido anacárdico	71,0 – 82,0	1,1 – 1,8
Cardanol	1,2 – 9,2	60,0 – 68,0
Cardol	13,8 – 20,1	15,0 – 18,1
2-Metilcardol	1,6 – 3,9	1,0 – 3,3
Material Polimerizado	0 – 2,0	0 – 7,4

Fonte: adaptado de França (2007).

O LCC técnico está associado a processos industriais já consolidados, caracterizados por maiores volumes de produção e menor valor agregado, enquanto o LCC natural apresenta menor escala produtiva e preserva, em maior grau, sua composição original. No contexto das pesquisas, em misturas asfálticas, observa-se que o LCC técnico é o tipo mais frequentemente investigado, especialmente em estudos voltados à modificação de ligantes asfálticos.

Ribeiro (2011) avaliou o efeito de ligantes asfálticos modificados com líquido da castanha de caju (LCC) na resistência ao dano por umidade de misturas asfálticas, analisando ligantes com teores de LCC de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%. Os resultados indicaram que a adição de LCC promoveu redução da viscosidade do ligante e, consequentemente, das temperaturas de usinagem e compactação em todas as formulações, destacando-se o ligante com 2% de LCC, que apresentou reduções de 11% e 16% na viscosidade antes e após o envelhecimento de curto prazo (RTFO), além de uma diminuição de 2 °C nas temperaturas de usinagem e compactação. No desempenho das misturas, observou-se que o CAP modificado com LCC proporcionou aumento de 42% na resistência ao dano por umidade em relação à mistura de referência, enquanto a rigidez, avaliada pela relação entre amostras condicionadas e não condicionadas, apresentou incremento de 46%, sendo verificado, de modo geral, que a mistura contendo ligantes modificado com 2% de LCC apresentou o melhor desempenho entre as formulações analisadas, atendendo aos critérios mínimos de aceitação adotados.

Oliveira (2015) analisou o potencial antioxidante do líquido da castanha de caju (LCC) aplicado a materiais asfálticos, utilizando diferentes métodos de envelhecimento.

O LCC foi empregado como modificador de ligante asfáltico CAP 50/70, sendo analisados tanto os ligantes convencionais quanto os modificados com 2% de LCC, além das respectivas misturas asfálticas, antes e após distintos processos de envelhecimento. Os resultados obtidos nos ensaios realizados com os ligantes indicaram que o LCC atua como antioxidante em amostras submetidas ao envelhecimento de curto prazo, não apresentando, entretanto, o mesmo desempenho em condições de envelhecimento à longo prazo. Em relação às misturas asfálticas, observou-se que a mistura modificada com LCC apresentou tendência à redução da rigidez.

O estudo de Joseph e Bindu (2022) avaliou o desempenho do líquido da casca da castanha do caju (LCC) como aditivo orgânico sustentável para misturas asfálticas mornas (WMA) e misturas mornas com ligante modificado (RWMA). A incorporação de 2% de LCC ao ligante e ao ligante modificado com borracha natural resultou em melhorias no desempenho mecânico em comparação às misturas convencionais à quente. Os resultados experimentais mostraram redução da profundidade de trilha de roda de 42,4% para WMA e 9,5% para RWMA, além de aumentos no índice de resistência à umidade (TSR) de 18,07% e 13,5%, respectivamente, atendendo aos requisitos mínimos normativos. Em termos de fadiga, as misturas com LCC suportaram até 12,36% (WMA) e 9,04% (RWMA) mais ciclos até a ruptura, atribuídos à melhoria da adesão agregado–ligante promovida pelas propriedades antioxidantes e antidesagregantes do CNSL. Com isso, os autores apontam o LCC como um aditivo eficiente e ambientalmente sustentável, capaz de melhorar a resistência à deformação permanente, à degradação por umidade e à fadiga, posicionando a WMA com LCC como uma alternativa promissora às misturas asfálticas a quente convencionais.

Uchoa *et al.* (2024) estudaram o potencial de óleo de rícino epoxidado e líquido acrilado da casca da castanha do caju (ACNSL) na restauração das propriedades de ligantes asfálticos envelhecidos em laboratório a curto e longo prazo. Os resultados indicaram que ambos os bio-óleos apresentaram desempenho satisfatório como agentes rejuvenescedores. Destaca-se que o ligante modificado com 7% de ACNSL apresentou redução nos valores de $J_{nr3.2}$ em comparação ao ligante de referência, nas temperaturas de 64 °C e 70 °C, indicando melhoria na resistência à deformação permanente, enquanto a amostra com 10% de ACNSL apresentou fator de fadiga superior (1.37) em relação às

demaís. Os autores concluem que os bio-óleos analisados possuem elevado potencial para a regeneração de ligantes asfálticos envelhecidos, contribuindo para a viabilização da reciclagem desses materiais.

Cao *et al.* (2025) investigaram o desempenho de ligantes asfálticos modificados com poliuretano de base biológica, com destaque para o LCC, combinado a pré-polímeros isocianatos, visando a obtenção de modificadores mais sustentáveis. Os resultados indicaram que o sistema poliuretano-LCC promoveu aumento do ponto de amolecimento. Em comparação ao asfalto convencional e ao poliuretano sintético, o ligante modificado com LCC apresentou desempenho superior em altas temperaturas e melhoria na resistência à fadiga, com vida à fadiga aproximadamente 61% maior que a do asfalto base e 15% superior à do poliuretano convencional.

2.4. DANO POR FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

A fadiga é conhecida como o principal mecanismo responsável pela degradação dos pavimentos asfálticos flexíveis (Oliveira *et al.*, 2022). O estudo da fadiga vem sendo realizado ao longo dos anos, a fim de compreender e modelar corretamente esse mecanismo de deterioração, contudo a engenharia rodoviária ainda enfrenta dificuldades, tendo em vista que grande parte dos pavimentos apresentam trincamento prematuro (Kachkouch *et al.*, 2022).

O dano por fadiga pode ser descrito como a redução gradual da rigidez e da resistência do material em decorrência da aplicação de tensões repetitivas, estando geralmente associado à perda de área resistente da seção transversal devido ao surgimento e à propagação de microfissuras distribuídas. A fadiga caracteriza-se como um fenômeno progressivo, no qual ocorrem mudanças estruturais permanentes e localizadas em materiais submetidos a deformações variáveis, levando a ocorrência de microfissuras, e, conseqüentemente, ao desenvolvimento de macrotrincas. Estas, por fim, resultam na ruptura do material e redução de sua vida útil (ASTM, 1979; Freire, 2014; Lopes, 2022).

Quanto ao mecanismo de evolução, a ruptura por fadiga em misturas asfálticas ocorre em três estágios: (i) o primeiro estágio marca o início do fissuramento com fissuras macroscópicas, que representam apenas uma pequena parte da vida de fadiga; (ii) no

segundo estágio, as microfissuras crescem até atingir um comprimento crítico de ,aproximadamente, 7,5 mm, originando uma trinca estável que consome a maior parte da vida de fadiga do revestimento; (iii) já no terceiro estágio, ocorre a propagação instável das trincas até atingirem a superfície do pavimento, ocasionando sua ruptura (Dapper, 2020, Bernucci, 2022).

O fenômeno de fadiga está diretamente associado ao comportamento reológico do ligante asfáltico, componente mais vulnerável da mistura asfáltica (Hassanpour-Kasanagh *et al.*, 2020). Esse comportamento sofre alterações ao longo do tempo em função do envelhecimento do ligante, o qual é influenciado por seu tipo e qualidade, pelas condições climáticas e pelas características da mistura asfáltica empregada (Arao, 2014). O comportamento à fadiga de misturas asfálticas pode ser avaliado em laboratório por meio de ensaios com carregamentos cíclicos controlados em termos de frequência, temperatura, tensão ou deformação, visando simular as solicitações impostas pelo tráfego. No entanto, a reprodução fiel das condições reais de campo é limitada, devido à variabilidade de cargas, tipos de eixos, velocidades de tráfego e condições ambientais às quais os pavimentos estão sujeitos ao longo de sua vida útil (Aurilio *et al.*, 2021).

2.4.1. Ensaios de fadiga em misturas asfálticas

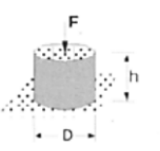
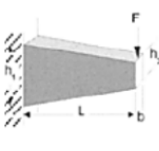
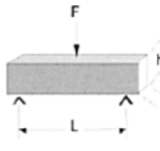
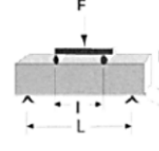
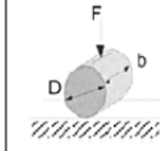
A resistência à fadiga de misturas asfálticas pode ser analisada por ensaios in situ e em laboratórios. Os ensaios in situ são realizados em escala real, aplicando cargas de tráfego controladas em trechos experimentais e seu desempenho apresenta uma condição real de operação, enquanto os ensaios laboratoriais investigam as propriedades do material em condições controladas de carregamento.

Devido à grande variabilidade das condições de campo, existem diversos tipos e configurações de ensaios laboratoriais, que buscam simular adequadamente essas condições. Entre os ensaios de fadiga em misturas asfálticas, destacam-se o ensaio de tração sob compressão diametral, de flexão em vigas prismáticas ou trapezoidais e o ensaio de tração direta (Akbari e Modarres, 2018).

A Figura 1 apresenta as diferentes configurações de ensaios utilizados para fadiga podem ter variações tanto em sua geometria quanto as condições da aplicação do

carregamento. Apenas o ensaio realizado por tração direta apresenta um estado de tensões e deformações teoricamente uniforme (Oliveira *et al.*, 2023). A seguir, cada tipo de ensaio será apresentado, destacando suas características específicas e como essas particularidades afetam a resposta das misturas à fadiga.

Figura 1: Diferentes configurações de ensaios de fadiga.

Configuração do Ensaio					
Carregamento	Tração/Compressão Direta	Flexão em dois pontos	Flexão em três pontos	Flexão em quatro pontos	Tração indireta
	estado homogêneo	estado não homogêneo	estado não homogêneo	estado não homogêneo	estado não homogêneo

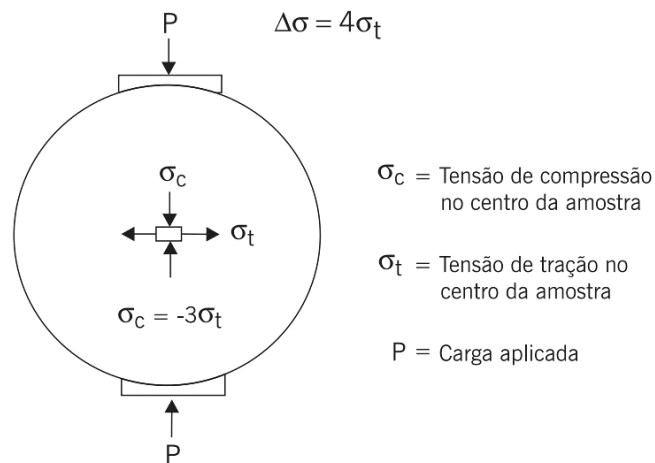
Fonte: Adaptado Di Benedetto *et al.* (2004) *apud* Queiroz (2022).

• **Fadiga por compressão diametral**

O ensaio de fadiga à compressão diametral consiste na aplicação de uma carga compressiva cíclica sobre um corpo de prova cilíndrico, resultando no desenvolvimento de uma tensão de tração aproximadamente uniforme ao longo do plano vertical diametral, paralelo à linha de aplicação da carga. O carregamento é aplicado com frequência de 60 ciclos por minuto, por meio de pulsos de carga de 0,1 s, seguidos por períodos de repouso de 0,9 s, conforme normativa do DNIT 183/2018-ME.

Apesar de suas vantagens operacionais, esta configuração de ensaio apresenta limitações importantes, sobretudo devido à concentração de tensões cisalhantes nas regiões de contato dos frisos de carregamento. Essas concentrações tendem a induzir acúmulo localizado de deformações permanentes, interferindo na avaliação do processo de fissuração por fadiga e podendo resultar na subestimação da vida à fadiga do material (Colpo, 2014).

Figura 2: Representação das tensões no centro de um CP no ensaio de fadiga

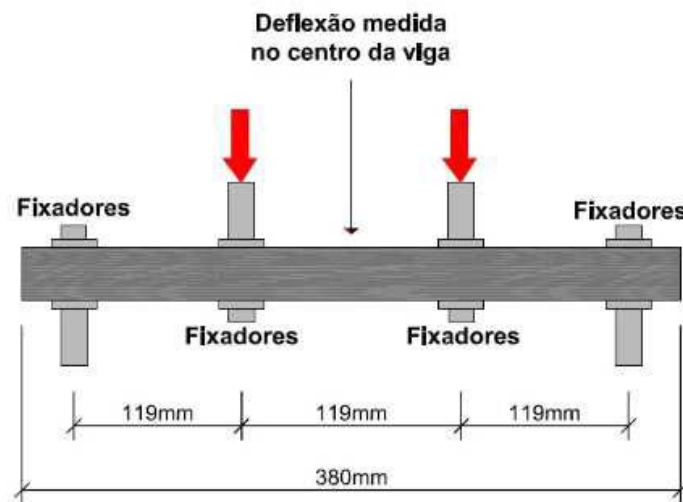


Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2022.

- **Fadiga à flexão:**

Os ensaios de fadiga à flexão são empregados para avaliar a resistência de materiais submetidos a carregamentos cíclicos, simulando o tráfego de veículos. Destacam-se o ensaio de fadiga à flexão trapezoidal em dois pontos e em viga de quatro pontos.

Figura 3: Configuração do ensaio de flexão em viga quatro pontos.



Fonte: Adaptado de Colpo (2014).

O ensaio em viga trapezoidal é realizado a uma frequência de 25 Hz e temperatura de 10°C com a amostra engastada na base maior, e aplicada uma tensão ou deformação horizontal na base menos, ocasionando em uma deformação de tração no terço médio da

amostra. O ensaio foi desenvolvido na França e é normatizado pela EN 12697-24. O critério de parada é definido pela redução de 50% da tensão inicial após 100 ciclos de carregamento, sendo a curva de fadiga obtida a partir da aplicação de diferentes níveis de deformação (Colpo, 2014).

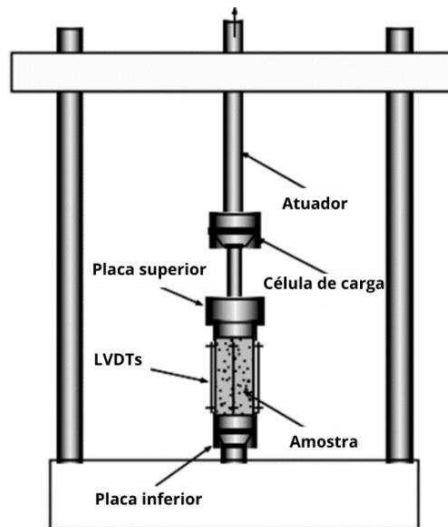
Apesar de permitir uma avaliação eficiente do comportamento à fadiga, a moldagem das amostras prismáticas constitui uma desvantagem operacional em relação às amostras cilíndricas, uma vez que geralmente exige a extração em campo ou a moldagem em placas seguida de serragem em laboratório, mesmo sendo um ensaio de execução relativamente rápida.

O ensaio de fadiga à flexão em viga de quatro pontos, padronizado pelas normas AASHTO T-321 e a ASTM D7460, utiliza corpos de prova prismáticos com apoio duplo. As normativas estabelecem a rigidez à flexão como a razão entre a tensão máxima de tração e a deformação máxima da viga. Durante o ensaio, cargas verticais são aplicadas nos terços médios da viga, criando uma região central com tração uniforme, onde o momento fletor é constante e os esforços cortantes são desprezíveis. O critério de falha pode ser definido pela ruptura total da amostra (tensão controlada) ou pela redução de 50% da rigidez inicial (deformação controlada). A configuração do carregamento é considerada representativa das condições de campo, uma vez que a região compreendida entre os dois pontos de aplicação da carga apresenta momento fletor constante e ausência de esforços cortantes (Tayebali *et al.*, 1994).

- **Tração direta**

O ensaio uniaxial cíclico de fadiga por tração direta é realizado aplicando uma deformação cíclica senoidal de amplitude constante em corpos de prova cilíndricos, até que, com a evolução e o acúmulo de dano, a amostra rompe por fadiga. O ensaio é regido pela normativa AASHTO TP 107-14, que estabelece o método padrão para determinar a curva característica de dano em misturas asfálticas por meio do ensaio de fadiga a tração direta.

Figura 4: Equipamento ensaio de fadiga a tração-compressão.



Fonte: Guedes (2024).

Durante o ensaio são monitorados os parâmetros de deformação axial, carga aplicada, módulo dinâmico e ângulo de fase. A falha do material é observada pela queda do ângulo de fase (Babadopulos, 2014). Conforme a normativa, a caracterização do dano e a avaliação do comportamento à fadiga da mistura asfáltica podem ser realizadas com a utilização de apenas três corpos de prova.

O ensaio permite avaliar a degradação progressiva da estrutura do material resultante da aplicação repetida de carregamentos cíclicos, possibilitando a obtenção da curva característica de dano (C vs. S). Essa curva descreve a relação entre a pseudo-rigidez (C), associada ao nível de integridade estrutural da mistura, e o parâmetro de dano (S), que representa a evolução das microestruturas danificadas ao longo dos ciclos de carregamento. Uma das principais vantagens dessa abordagem é o fato de a curva característica de dano ser independente da temperatura, da frequência de carregamento e do tipo de sollicitação aplicada, permitindo sua utilização sob diferentes condições operacionais.

2.5. AUTORREGENERAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS

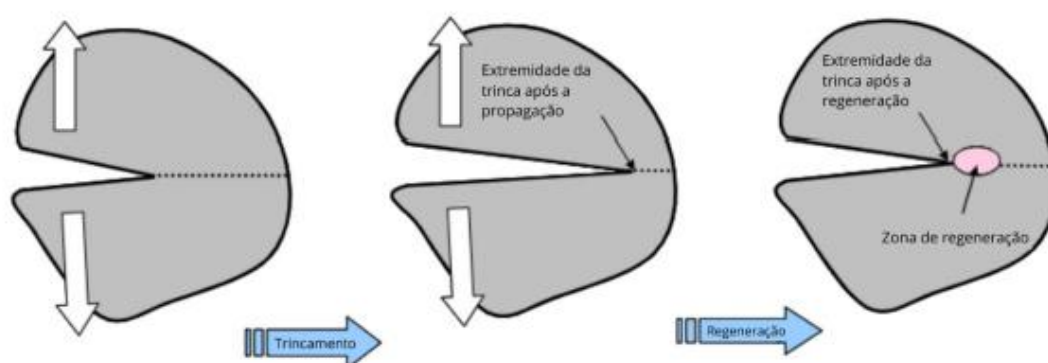
Os materiais asfálticos apresentam uma capacidade natural de autorregeneração, caracterizada como uma propriedade intrínseca relacionada à recuperação dos danos parcialmente desenvolvidos em sua estrutura ao longo do tempo (Wang e Hao, 2021).

Entretanto, em razão da complexidade dos mecanismos envolvidos, observa-se uma diversidade de abordagens experimentais, modelos teóricos e análises numéricas empregadas para a compreensão desse fenômeno, o que pode resultar em interpretações divergentes na literatura (Shirzad *et al.*, 2019).

O dano por fadiga resulta da iniciação e propagação de trincas provocadas pela aplicação repetida das cargas de tráfego, bem como pela influência das variações de temperatura e das condições climáticas. Na literatura existem dois principais tipos de mecanismos de *healing*: cura coesiva e cura adesiva. A cura coesiva refere-se à integridade interna do ligante da mistura, incluindo ligante asfáltico e *fillers*, enquanto a cura adesiva foca na interação entre betume e agregado (Kachkouch *et al.*, 2022). Segundo Jwaida *et al.* (2024) o ligante asfáltico exerce um papel importante na recuperação de parte dos danos por fadiga por meio de processos difusivos e viscoelásticos, evidenciando sua capacidade intrínseca de autorregeneração.

O fenômeno da autorregeneração ou “*self-healing*” ocorre de forma mais acentuada em climas quentes e durante o verão em regiões de clima frio, sendo também favorecido pelos períodos de repouso aos quais o pavimento é submetido (García, 2012). Segundo Qiu, Van de Ven e Molenaar (2013) a interrupção da aplicação das cargas e a introdução de um intervalo de repouso promove um processo de autorregeneração, que pode ser interpretado como uma reversão ou desaceleração da propagação das fissuras. Esse processo é dependente do tempo e da temperatura durante o período de regeneração, influenciando diretamente a extensão das trincas dentro da zona de regeneração.

Figura 5: Hipótese do processo de fechamento de trincas.

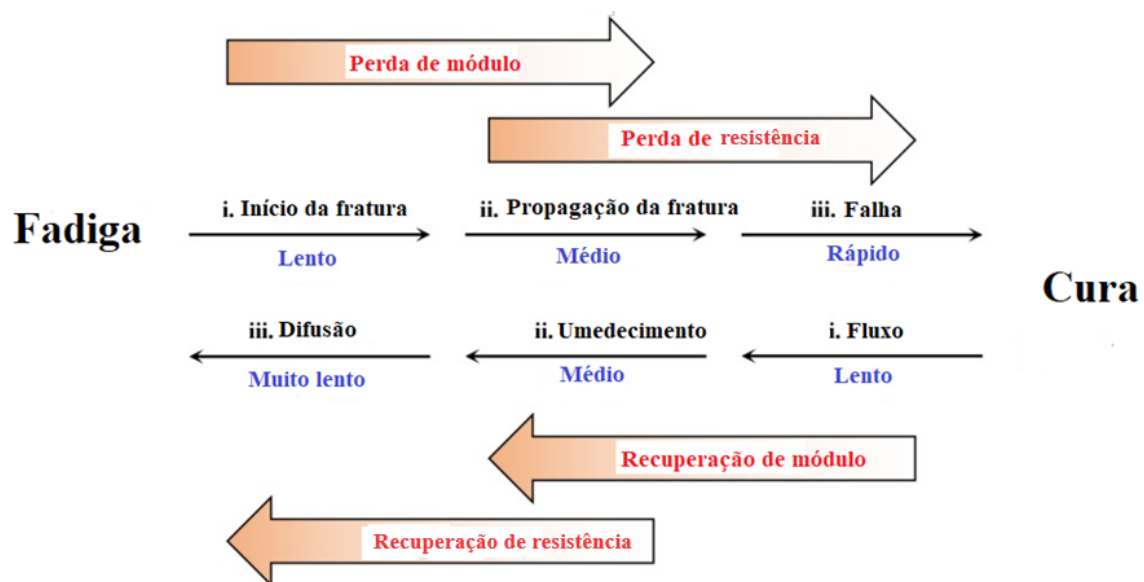


Fonte: Qiu, Van de Ven e Molenaar (2013).

Qiu, Van de Ven e Molenaar (2013) apresentam, na Figura 5, um esquema da propagação da trinca e de sua posterior autorregeneração, que ocorre em uma região específica denominada zona de regeneração, na qual o material recupera parcialmente sua integridade estrutural, contribuindo para o aumento da durabilidade e da vida útil das estruturas.

O *self-healing* ocorre de maneira inversa ao processo de fadiga em materiais asfálticos (Figura 6) e pode ser descrito por um modelo de três estágios, originalmente proposto por Phillips (1998) e discutido por Jwaida *et al.* (2024) e Barros (2020). Esse modelo estabelece uma analogia com as etapas da fadiga (formação, propagação de trincas e falha estrutural), porém em sentido oposto, representando a recuperação parcial do dano: (i) aproximação das interfaces da trinca, influenciada pela redistribuição das tensões e pelo fluxo do ligante asfáltico, associado à compressão ou ao aquecimento; (ii) fechamento das microfissuras e o desenvolvimento de coesão, favorecidos por umedecimento (*wetting*), no qual as superfícies da trinca se aderem em função da energia livre de superfície; (iii) recuperação parcial das propriedades mecânicas do material, controlada pela difusão molecular e pela reorganização das estruturas de asfaltenos.

Figura 6: Mecanismo de cura em três etapas no asfalto.



Fonte: Jwaida *et al.* (2024).

Jiang *et al.* (2019) destacam que o fenômeno de regeneração em materiais asfálticos pode ser observado em diferentes escalas: macro, micro e mesoescala. Nesse contexto, as definições de *healing* podem variar conforme o nível de análise, sendo avaliadas por critérios como a separação de fases, a redução da área danificada e a recuperação das propriedades mecânicas do material (Kachkouch *et al.*, 2022; SUN *et al.*, 2018; JIANG *et al.*, 2019).

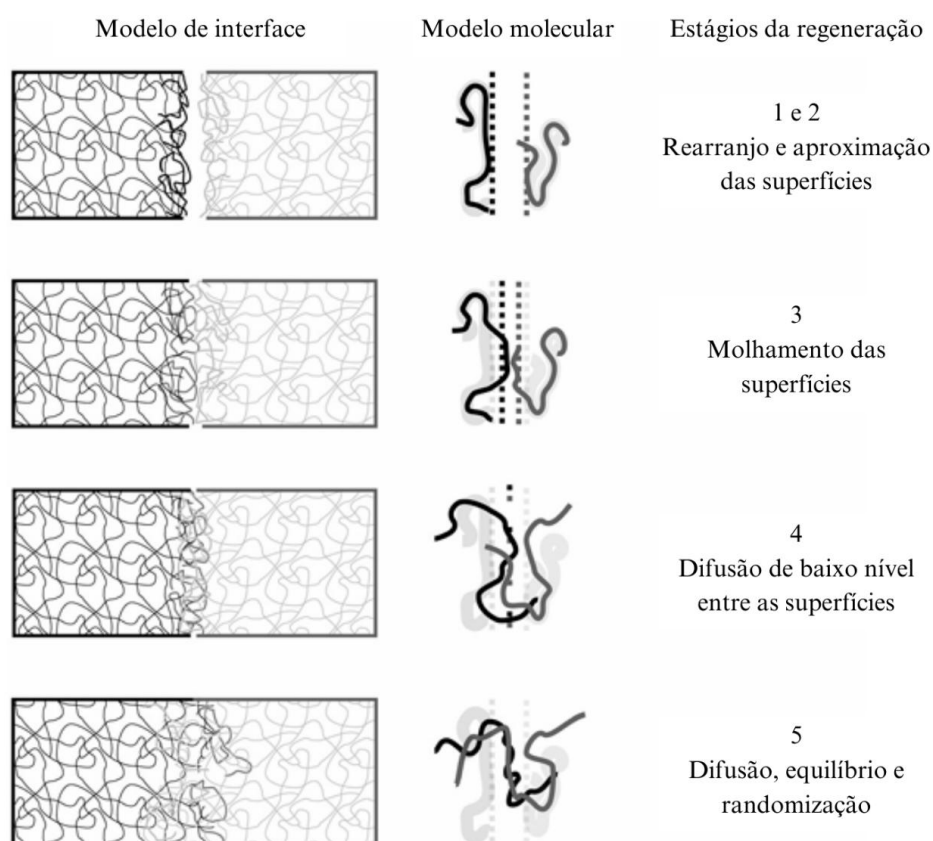
A autorregeneração em macroescala refere-se à recuperação do desempenho global das misturas asfálticas, observado em termos de propriedades mecânicas e resposta estrutural do pavimento após períodos de repouso. Nesse nível de análise, o foco está na capacidade do material de recuperar rigidez e retardar a propagação de trincas que afetam a integridade estrutural do pavimento (Xue *et al.*, 2017).

Em macroescala ($\approx 10^{-3}$ m) as fissuras podem ser observadas a olho nu, e a recuperação do material ocorre de formas distintas. As microfissuras podem ser reparadas durante os períodos de repouso entre ciclos de carregamento, ou fissuras formadas no inverno podem se regenerar ao longo do verão, quando as condições térmicas favorecem o fluxo e a coesão do ligante asfáltico (Sun *et al.*, 2018)

O conceito de *self-healing* do ligante asfáltico surgiu a partir do modelo de trincas em materiais poliméricos, embora existam diferenças específicas com relação à composição e propriedades do asfalto. Esse modelo de regeneração foi inicialmente descrito por Wool e O'Connor (1981) com cinco estágios de regeneração (Figura 7).

Inicialmente, durante a aproximação superficial, as faces da trinca se aproximam para permitir a adesão. Em seguida, no estágio de umedecimento, forma-se uma interface mais definida entre as superfícies da fissura. O estágio de difusão, considerado o mais crítico, promove a reação entre os componentes do asfalto e a consolidação do material, restaurando parcialmente suas propriedades mecânicas (Zhao, Wang, Wang, 2023). Por fim, no estágio de aleatorização, as interfaces desaparecem completamente, e as propriedades do material se estabilizam.

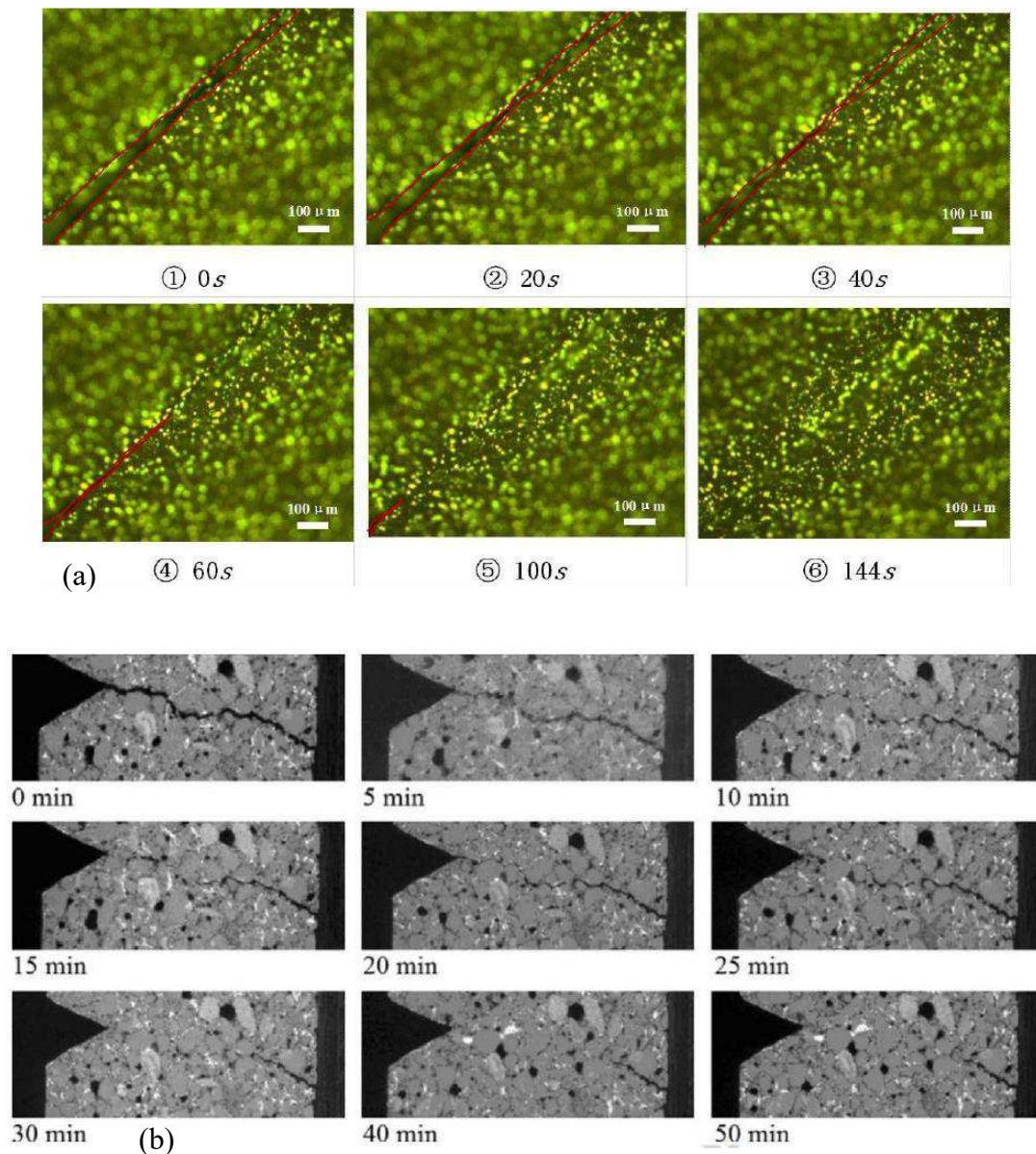
Figura 7: Estágios de regeneração.



Fonte: Wool e O'Connor (1981).

Em mesoescala, a autorregeneração ocorre por meio do fluxo do ligante asfáltico e do fechamento das trincas. Essa escala intermediária, que abrange dimensões da ordem de micrômetros a milímetros, é influenciada pela estrutura e composição do material, bem como pelas condições ambientais (Barros, 2020). Para analisar o processo de *self-healing* nesse nível, são comumente empregadas técnicas como microscopia de fluorescência e tomografia computadorizada, permitindo observar detalhadamente a evolução das fissuras e a recuperação parcial das propriedades mecânicas do asfalto (García *et al.*, 2012).

Figura 8: Técnicas de mensuração do healing em mesoescala: (a) Microscopia de fluorescência do processo de autorregeneração de um ligante asfáltico modificado por SBS; (b) Tomografia computadorizada de uma amostra de ligante asfáltico após aquecimento, seguido de diversos períodos de repouso.



Fonte: (a) Sun *et al.* 2017; (b) Garcia *et al.*, 2012.

Oliveira (2019) investigou os efeitos da introdução de períodos de repouso em ensaios de fadiga de ligantes e misturas asfálticas e observou que os valores de vida de fadiga (N_f) obtidos em ensaios com repouso, constituídos por cinco ciclos de 4 h, são praticamente idênticos àqueles verificados em ensaios sem interrupção. Resultados semelhantes foram observados para as misturas asfálticas, não sendo identificadas variações significativas associadas à adoção dos mesmos períodos de repouso. Embora

se constate uma recuperação do módulo durante o longo intervalo de repouso adotado, essa recuperação não se reflete no valor final da vida de fadiga, sobretudo na escala do ligante. Dessa forma, a recuperação do módulo não parece estar diretamente associada ao fenômeno de auto cicatrização (*healing*), amplamente descrito na literatura, estando mais relacionada a outros efeitos reversíveis, como a não linearidade do material, o auto-aquecimento e a tixotropia. Destaca-se ainda que, de modo recorrente, a redução do módulo é utilizada como indicador da evolução do dano, desconsiderando a influência desses fenômenos adicionais, o que pode levar à interpretação de que toda recuperação do módulo seja atribuída exclusivamente ao *healing*. No entanto, variações de temperatura, por exemplo, afetam significativamente o comportamento reológico e mecânico dos materiais viscoelásticos, influenciando diretamente a evolução do módulo ao longo dos ensaios.

2.5.1. Fatores que influenciam a autorregeneração

A capacidade de regeneração do material asfáltico é afetada por diversos fatores, relacionados tanto às propriedades intrínsecas do material quanto às condições ambientais. No caso do ligante asfáltico destacam-se o tipo de ligante, o envelhecimento e a presença de aditivos. Já a mistura asfáltica é influenciada por sua composição, incluindo o teor de ligante, a estrutura do agregado e o volume de vazios. Além disso, fatores externos, como períodos de repouso e tipo de carregamento, também impactam a eficiência do processo de *healing* (Anupam *et al.*, 2022; Tabakovic e Schlangen, 2015).

As propriedades do ligante asfáltico exercem papel fundamental na capacidade de autorregeneração das misturas asfálticas. Ligantes com menor rigidez e menor viscosidade tendem a apresentar melhor desempenho regenerativo, uma vez que favorecem o fluxo e a recomposição das microfissuras (Qiu, 2012; Garcia *et al.*, 2014; Almurati *et al.*, 2023). Por outro lado, o envelhecimento do ligante reduz essa capacidade de reparação em razão do aumento de compostos macromoleculares, que elevam a rigidez do material; entretanto, a adição de agentes rejuvenescedores pode atenuar esse efeito e contribuir para a recuperação parcial das propriedades originais do ligante (Sun *et al.*, 2022; Xiang *et al.*, 2022; Xin *et al.*, 2022).

A capacidade de autorregeneração do ligante asfáltico também é influenciada por parâmetros da mistura asfáltica. De modo geral, maiores teores de ligante favorecem o desempenho do healing. A estrutura do agregado influencia diretamente a capacidade mecânica da mistura, sendo observado que misturas com maior proporção de agregado graúdo apresentam regeneração mais rápida quando comparadas àquelas com maior teor de agregado miúdo. Além disso, menores volumes de vazios contribuem para uma melhor regeneração, devido a presença de maior teor de ligante (Tang *et al.*, 2016; Almuturi *et al.*, 2023).

Quanto aos fatores ambientais, na pavimentação são comuns os períodos de repouso entre os pulsos de carga gerados pela passagem dos veículos sobre o pavimento. Esses intervalos exercem influência direta no processo de autorregeneração, existindo um tempo de repouso considerado ideal para a reparação do material. Períodos muito curtos não permitem a recuperação adequada das fissuras, enquanto intervalos excessivamente longos podem acelerar o envelhecimento do ligante asfáltico (Zhang *et al.*, 2021). Em ensaios laboratoriais de fadiga, esse comportamento é reproduzido por meio da interrupção controlada do carregamento durante um período de repouso predefinido, sendo o ensaio posteriormente retomado até o próximo intervalo.

2.5.2. Autorregeneração em misturas asfálticas recicladas

Em misturas recicladas com RAP, o processo de autorregeneração apresenta desafios adicionais. O ligante envelhecido presente no RAP tende a reduzir a mobilidade e fluidez da mistura, limitando a capacidade de recuperação das fissuras geradas durante o carregamento (Mullapudi *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020; Liang *et al.*, 2021). Dessa forma, embora a incorporação de RAP seja uma estratégia sustentável e econômica, sua interação com os mecanismos de autorregeneração ainda não é completamente compreendida.

Mollamohammadi1 e Hesami (2018) estudaram o efeito de ligante proveniente de agregado RAP modificado com óleo de fritura residual e polímero SBS na capacidade autorregenerativa de misturas asfálticas, avaliando o impacto sobre a fadiga e a recuperação de rigidez após períodos de repouso. Para isso, foram realizados ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos com períodos de descanso de 24 h, além de testes

reológicos para analisar mudanças na rigidez e no comportamento à fadiga do ligante. Os resultados mostraram que a mistura reciclada sem modificador apresentou menor vida útil à fadiga e recuperação de rigidez em relação à mistura de referência. A vida à fadiga aumentou de 17.911 ciclos para 116.619 ciclos com a adição de óleo de fritura usado, alcançando 143.119 ciclos após 24 horas de repouso. A combinação do óleo com o polímero também melhorou o desempenho, embora em menor intensidade. Os resultados indicam que o uso de rejuvenescedores pode restaurar a capacidade de autorregeneração das misturas recicladas, aumentando a durabilidade do pavimento.

Mullapudi *et al.* (2023) demonstraram que a capacidade de autorregeneração de misturas asfálticas recicladas diminui com o aumento do teor de RAP. A inclinação da curva de fadiga reduziu ao passar de 15 % para 35% de RAP, enquanto a energia livre de superfície do ligante caiu com 45% de RAP, dificultando a penetração do ligante nas fissuras e comprometendo a recuperação estrutural da mistura. De forma complementar, González *et al.* (2017) avaliaram o efeito da incorporação de RAP e fibras metálicas na capacidade de autorregeneração de misturas asfálticas submetidas ao aquecimento por micro-ondas. Os resultados indicaram que, embora o material reciclado tenda a reduzir a eficiência do processo de autorregeneração, a adição de fibras metálicas possibilitou a recuperação de fissuras quando o aquecimento externo foi aplicado. Os autores concluíram que misturas contendo até 30 % de material reciclado, associadas ao uso de fibras metálicas, apresentam potencial para autorregeneração por aquecimento por micro-ondas, configurando uma alternativa viável para a reabilitação de pavimentos asfálticos.

O estudo de Ye *et al.* (2024) avaliou misturas asfálticas com agregados reciclados de concreto e pavimento asfáltico reciclado, usando aquecimento por indução para estimular a autorregeneração. Os resultados mostraram que, com 20 % de agregados reciclados de concreto e até 10 % de pavimento reciclado, a profundidade de aquecimento permitiu completa recuperação das amostras, e a eficiência cumulativa de autorregeneração atingiu 291 %, próxima à das misturas convencionais. Os autores concluíram que, com dosagens controladas, é possível manter desempenho comparável ao convencional, aumentando a durabilidade e reduzindo impactos ambientais.

2.6. ALTERNATIVAS PARA INTENSIFICAÇÃO DA AUTOREGENERAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Embora a capacidade intrínseca de autorregeneração dos materiais asfálticos seja amplamente reconhecida, esse fenômeno é limitado pelas condições de campo, uma vez que nem sempre estão disponíveis temperaturas adequadas e períodos de repouso suficientes para que o *healing* consiga compensar a deterioração natural da mistura asfáltica (Qiu, 2012). Diante dessas limitações, diversas pesquisas (Almeida Junior, 2022; Arruda *et al.*, 2024; Badroodi *et al.*, 2020; Barros, 2020; Al-Mansoori, 2018; Micaelo *et al.*, 2016) têm sido conduzidas com o objetivo de intensificar o processo natural de regeneração, buscando modificar fatores internos e externos do material, como o aumento da temperatura e a redução da viscosidade do ligante asfáltico. Entre as principais estratégias investigadas destacam-se o aquecimento por indução e a adição de agentes rejuvenescedores (Xu *et al.*, 2018; Barros, 2020; Macedo, 2025).

2.6.1. Aquecimento por indução

No método de aquecimento por indução, partículas eletricamente condutivas ou magneticamente suscetíveis, como fibras de lã de aço, são inseridas às misturas asfálticas com o objetivo de aumentar sua capacidade de autorregeneração. Quando o material é exposto a um campo magnético variável, correntes elétricas são induzidas nas fibras, resultando na geração de calor o tornando-o mais fluido e favorecendo seu escoamento em direção às trincas, por ação da gravidade, da tensão superficial ou da pressão gerada pela expansão térmica do ligante, promovendo o preenchimento das fissuras (Grossegger *et al.*, 2018). Em laboratório, o aquecimento por indução é realizado com a máquina de aquecimento por indução com bobina para gerar o campo magnético (Garcia *et al.*, 2011).

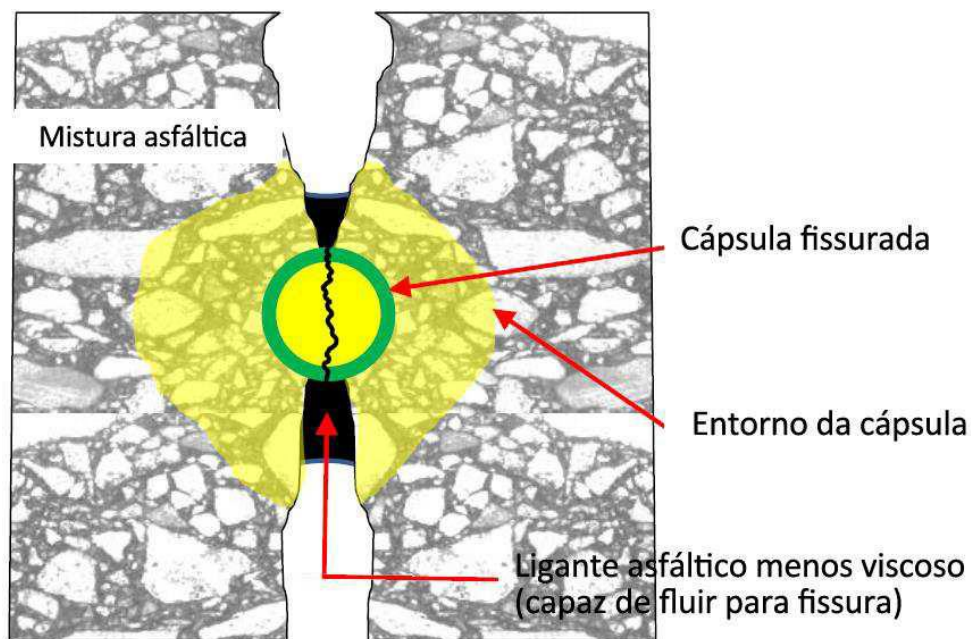
Apesar do aquecimento por indução apresentar resultados promissores na intensificação do fenômeno de *self-healing* em materiais asfálticos, alguns estudos apontam limitações desse método. A incorporação de fibras condutoras eleva o custo de produção das misturas, enquanto os equipamentos necessários para a indução de calor em campo apresentam alto custo de implantação. Além disso, a redução temporária da viscosidade do ligante durante o processo pode exigir a interrupção do tráfego (Xu *et al.*, 2018; Al-Mansoori, 2018).

2.6.2. Agentes rejuvenecedores encapsulados

Um dos métodos utilizados para intensificar o fenômeno de *self-healing* em misturas asfálticas é a incorporação de agentes rejuvenecedores encapsulados. Essa técnica consiste em aprisionar o agente rejuvenecedor em uma membrana, permitindo sua incorporação à mistura asfáltica durante o processo de usinagem e sua distribuição ao longo de toda a espessura do revestimento asfáltico (Micaelo *et al.*, 2016; Barros, 2020).

O mecanismo de funcionamento das microcápsulas baseia-se na liberação controlada de agentes rejuvenecedores em resposta ao dano mecânico. Quando ocorre a iniciação ou propagação de fissuras na matriz asfáltica, a concentração de tensões e a energia de fratura na ponta da trinca promovem o rompimento das cápsulas adjacentes. A liberação e difusão do rejuvenecedor pode restaurar as propriedades originais do ligante asfáltico, fazendo com que ele possa fluir com mais facilidade para as trincas e acelere o processo natural de *self-healing* (Figura 9) (Al-mansoori *et al.*, 2018).

Figura 9: Ilustração conceitual do processo de rompimento das cápsulas.



Fonte: Barros, 2020.

Zhao *et al.* (2022) verificaram a eficácia de cápsulas de alginato de cálcio na intensificação da autorregeneração de misturas asfálticas produzidas com ligante convencional e com ligante modificado por SBS. A avaliação do *self-healing* foi realizada

por meio de ensaio de flexão em três pontos, aplicando carregamento cíclico de compressão. Os resultados indicaram que as cápsulas permanecem estáveis após a compactação e liberam gradualmente o agente rejuvenescedor durante a aplicação das cargas, promovendo significativa recuperação de resistência. Após 64.000 ciclos, as misturas com cápsulas atingiram razões de recuperação de resistência de 79,2% para a mistura convencional e 66,4% para a mistura com ligante modificado por SBS. Entretanto, apesar da maior taxa de liberação do rejuvenescedor nas misturas com SBS, o desempenho de *healing* foi inferior à da mistura convencional, devido à incapacidade do agente rejuvenescedor de reparar a rede polimérica do SBS fraturada.

O estudo de Chen *et al.* (2025) investigou a viabilidade da aplicação prática, em larga escala, de cápsulas de alginato de cálcio em pavimentos asfálticos por meio de um trecho experimental. As cápsulas foram avaliadas quanto à resistência mecânica, apresentando valor médio de 11,05 N, além de serem caracterizadas por análise termogravimétrica. Os resultados de campo indicaram que a mistura contendo cápsulas atendeu aos requisitos de projeto, apresentando apenas uma leve redução de 1,2% na densidade máxima teórica e de 5% na estabilidade Marshall, em comparação com a mistura convencional. Para avaliar a distribuição das cápsulas na mistura asfáltica, amostras foram coletadas *in situ* e analisadas por tomografia computadorizada, constatando-se que apenas uma pequena fração das cápsulas foi rompida durante a compactação, com distribuição espacial relativamente uniforme. Os autores destacam ainda que o desempenho em serviço e as propriedades de autorreparação do trecho experimental serão monitorados ao longo do tempo, por meio de perfurações *in situ*, após 1, 2, 3, 4 e 5 anos de serviço.

Wan *et al.* (2025) avaliaram o comportamento de liberação de agentes rejuvenescedores encapsulados em cápsulas de alginato de cálcio incorporadas a mistura asfáltica, submetida a carregamentos cíclicos. Os resultados indicam que as cápsulas apresentam resistência mecânica e estabilidade térmica compatíveis com a produção de misturas asfálticas e são capazes de liberar gradualmente o rejuvenescedor quando submetidas à ação direta das cargas. A liberação aumenta com o tempo de aplicação do carregamento e é mais significativa em ensaios de trilha de roda, por representarem de forma mais realista as condições de tráfego. Análises por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) confirmaram a liberação do agente,

enquanto ensaios reológicos mostraram redução do módulo complexo e aumento da fluidez do ligante asfáltico nas regiões carregadas, evidenciando o potencial das cápsulas para intensificar o processo de autorregeneração. Entretanto, as cápsulas localizadas em zonas sem contato direto com a carga não foram ativadas, indicando que a eficiência do *healing* depende da solicitação mecânica aplicada.

2.7. MODELO VISCOELÁSTICO DE DANO CONTÍNUO SIMPLIFICADO (S-VECD)

A abordagem baseada na mecânica do dano contínuo viscoelástico simplificado (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage - S-VECD*) apresenta um protocolo consolidado para a análise do comportamento à fadiga de misturas asfálticas. Esse protocolo deriva do modelo de dano contínuo viscoelástico (*Viscoelastic Continuum Damage - VECD*), originalmente desenvolvido por Kim para aplicação em misturas asfálticas. O modelo VECD tem sido amplamente investigado na literatura, conforme demonstrado nos estudos de Kim, Daniel e Wen (2002), Chehab *et al.* (2003), Hou (2009), Underwood *et al.* (2010), Nascimento (2015) e Cao *et al.* (2016).

O *VECD* consiste em uma abordagem mecanicista que modela o comportamento de materiais viscoelásticos sob estados de tensão e deformação, abrangendo tanto os efeitos de viscoelasticidade linear e de dano causado por micro-trincas na estrutura do material. O modelo fundamenta-se em três princípios básicos: o princípio da correspondência elástico-viscoelástico, a teoria do trabalho potencial e o princípio da superposição tempo-temperatura (Kim, 2009; Mocelin, 2018; Nascimento, 2015).

O princípio da correspondência elástico-viscoelástico permite representar o comportamento de materiais viscoelásticos, como as misturas asfálticas, por meio de um material elástico equivalente, desde que sejam consideradas propriedades viscoelásticas apropriadas. Essa abordagem simplifica a modelagem e a análise do material (Hou, 2009; Cao *et al.*, 2016).

A aplicação do princípio da correspondência no modelo *VECD/S-VECD* baseia-se no uso de pseudo-variáveis, em especial a pseudo-deformação (ϵ^R), que substitui a deformação física ao eliminar os efeitos explícitos do tempo. A pseudo-deformação é

definida para carregamentos transitórios no modelo *VECD* (Equação 1) e para condições de estado estacionário no modelo *S-VECD* (Equação 2) (Mocelin, 2018). O uso de pseudo-variáveis permite uma representação mais eficiente do comportamento viscoelástico, simplificando a modelagem e a análise sob diferentes condições de carregamento, o que contribui para uma previsão mais precisa do desempenho do material (Oliveira *et al.*, 2022).

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

$$\varepsilon^R = \frac{1}{\varepsilon_R} \int_0^t E(t - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (2)$$

Em que:

ε^R = pseudo-deformação;

ε = deformação medida;

E_R = módulo de referência (normalmente adota-se E_R igual a 1);

T é a variável de integração (s) e t o tempo físico (s).

$\varepsilon_{0,ta}^R$ = amplitude da pseudo-deformação na condição de tração;

β = fator que quantifica a duração da carga de tração em um determinado ciclo (1 para tração total, 0 para carga totalmente revertida, e -1 para compressão total);

$\varepsilon_{0,pp}$ = Amplitude de deformação total (pico a pico);

$|E*|LVE$ = módulo dinâmico viscoelástico linear do material.

Adotando-se o módulo de referência $E_R = 1$, a pseudo-deformação passa a representar diretamente a resposta viscoelástica linear do material. Nessa condição, a razão entre a tensão (σ) e a pseudo-deformação (ε^R), denominada pseudo-rigidez ou integridade do material (C), assume valor unitário, indicando ausência de dano. Desvios desse valor caracterizam a ocorrência de danos e a perda de integridade do material, sendo C um dos principais parâmetros do modelo *VECD*, conforme definido pela Equação 3 (Hou, 2009; Babadopoulos, 2014). A Equação 4 estabelece a relação entre o módulo dinâmico obtido no ensaio de fadiga (*fingerprint*) e o módulo da caracterização viscoelástica linear.

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R} \quad (3)$$

$$DMR = \frac{|E^*|_{fingerprint}}{|E^*|_{LVE}} \quad (4)$$

Em que:

σ = tensão;

ε^R = pseudo-deformação;

$|E^*|_{fingerprint}$ = módulo dinâmico obtido no ensaio de *fingerprint*;

$|E^*|_{LVE}$ = módulo dinâmico absoluto nas condições de ensaio.

A determinação do dano (S) em ensaios monotônicos e no primeiro ciclo de ensaios cíclicos é realizada pela Equação 5. Para os ciclos subsequentes, adota-se a formulação simplificada da Equação 6, que incorpora o fator de ajuste K_1 , relacionado ao histórico de carregamento e definido pela Equação 7.

$$dS_i = \left(-\frac{1}{2} (\varepsilon^R)_i^2 \Delta C_i \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta \xi)_i^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \quad (5)$$

$$dS_i = \left(-\frac{1}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)_i^2 \Delta C_i^* \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta \xi_p)_i^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (K_1)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \quad (6)$$

$$K_1 = \frac{1}{\Delta \xi} \int_{\xi_i}^{\xi_f} (f(\xi))^{2\alpha} d\xi \quad (7)$$

Em que:

α = taxa de evolução do dano, definida como a máxima inclinação da curva módulo de relaxação vs tempo reduzido, em escala log-log;

$\Delta \xi$ = incremento de tempo reduzido;

$\varepsilon_{0,ta}^R$ = pseudo-deformação na condição de tração;

$\Delta \xi_p$ = intervalo de tempo reduzido do pulso de carga;

K_1 = fator de ajuste considerando que a pseudo-deformação não é constante ao longo do ciclo;

ξ_i e ξ_f = tempo reduzido de início e de fim da tensão de tração (de dano) para um dado ciclo, respectivamente.

As curvas de dano, representadas pela relação C versus S, podem ser ajustadas por funções potência (Equação 8). Com essa relação definida, a evolução do dano sob diferentes condições de carregamento pode ser prevista, permitindo simular o comportamento mecânico do material (Underwood *et al.*, 2012).

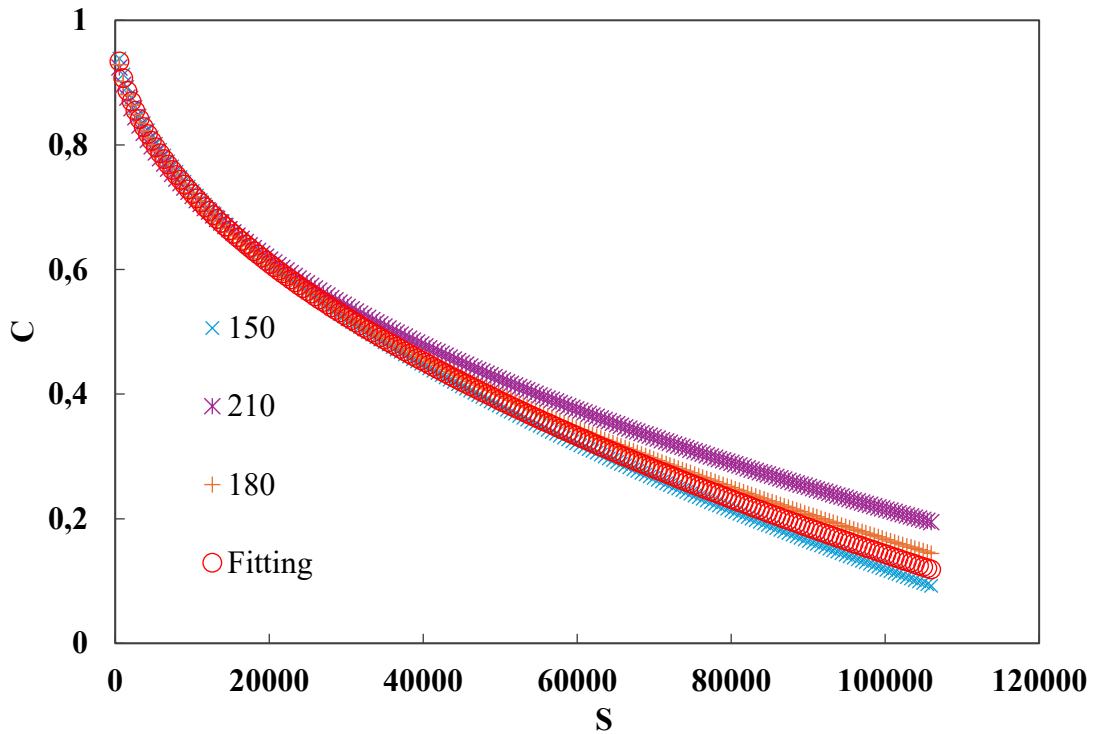
$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (8)$$

Em que:

C_{11} e C_{12} são constantes do ajuste para a função potência.

A aplicação do modelo resulta na obtenção da curva característica de dano (Figura 10), que relaciona a integridade da mistura (C) à variável de estado de dano (S), permitindo uma representação mais acurada do desempenho da mistura sob diferentes condições de carregamento. Essa curva estabelece a relação entre a pseudo-rigidez do material e o acúmulo de dano, sendo fundamental para análises de fadiga e regeneração.

Figura 10: Curva característica de dano



A teoria do trabalho potencial, proposta por Schapery (1990), relaciona a redução das propriedades de materiais elásticos ao dano. Parte do trabalho aplicado não é armazenada como energia de deformação, sendo consumida no processo de danificação. Esse efeito é quantificado por funções das variáveis de estado interno (S_m) do material, fundamentadas na termodinâmica de processos irreversíveis.

O desempenho mecânico de um material elástico com alterações estruturais é descrito pela relação entre tensões generalizadas (σ_i) e deformações generalizadas (ϵ_i), que podem

ser convertidas em variáveis físicas, como tensão-deformação ou força-deslocamento, conforme a aplicação.

$$\delta W = \sigma_i \times \delta \varepsilon_i \quad (9)$$

Em que: δW é o trabalho virtual e $\delta \varepsilon_i$ as deformações virtuais.

Segundo essa teoria, a densidade de energia de deformação é definida como $W = W(\varepsilon, S_m)$, em que S_m representa as variáveis de estado interno do material. Embora originalmente aplicada a materiais elásticos, a teoria do trabalho potencial pode ser estendida a materiais viscoelásticos por meio do princípio de correspondência elástico-viscoelástico, substituindo a deformação física pela pseudo-deformação. Nesse contexto, a função densidade de energia passa a ser descrita em termos de pseudo-deformação, e a relação entre tensão e deformação, considerando as variáveis de estado interno, é dada pela Equação 11. A evolução do dano (S) é determinada pela Equação 12, conforme proposta por Schapery (1975, 1984).

$$W = W^R(\varepsilon^R, S_m) \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{\partial W^R}{\partial \varepsilon^R} \quad (11)$$

$$S_m = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial S_m} \right) \alpha_m \quad (12)$$

Em que:

S_m é a variável de estado interno de dano

W^R é a densidade de energia de pseudodeformação.

α_m é a constante de ajuste característica do material, ligada diretamente às propriedades de creep e relaxação.

O princípio da correspondência elástico-viscoelástico possibilita representar os efeitos dependentes do histórico de carregamento em materiais viscoelásticos por meio de pseudo-variáveis, utilizando integrais de convolução. Com isso, a energia de deformação do material é reinterpretada como pseudo-energia de deformação, o que amplia a aplicação da teoria a análises mais realistas do comportamento mecânico

(Nascimento, 2015). Com base nesse conceito, as Equações 13 e 14 descrevem o modelo para materiais viscoelásticos sem danos e com dano, respectivamente.

$$\sigma = E_R \varepsilon^R \quad (13)$$

$$\sigma = C(S) \varepsilon^R \quad (14)$$

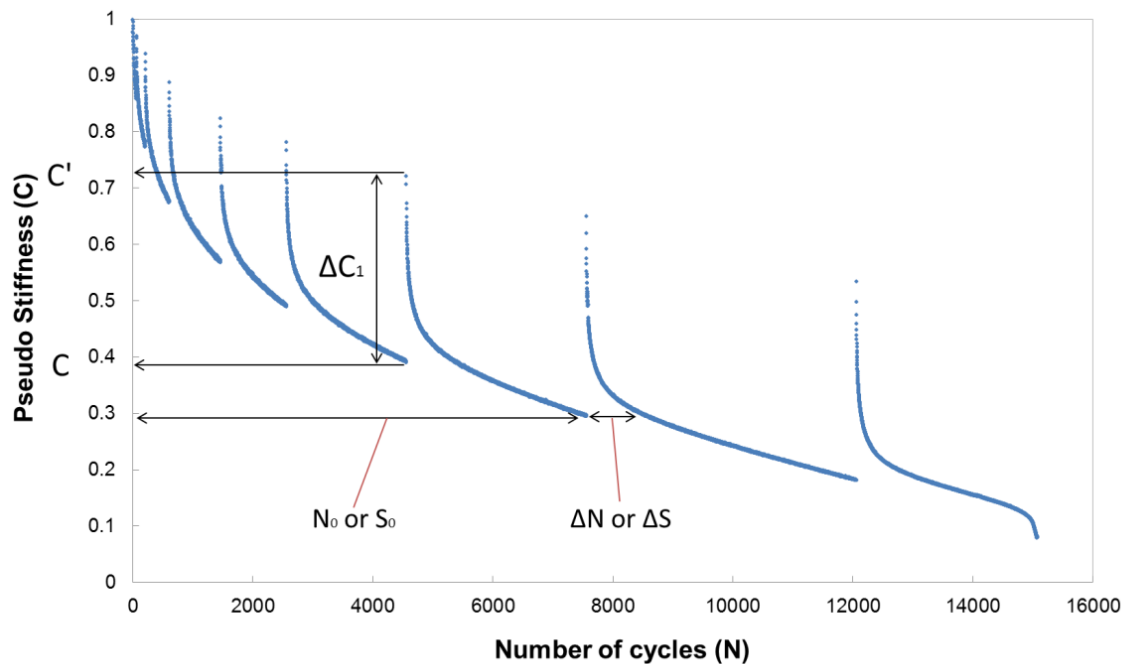
Onde:

$C(S)$ - pseudorrigidez relacionada à função dano (S).

Schuster (2018) aplicou o modelo S-VECD para a caracterização do dano por fadiga em misturas asfálticas com diferentes tipos de ligantes asfálticos e, a partir da análise das curvas $C \times S$, observou que misturas menos rígidas tendem a perder integridade de forma mais acentuada ao longo dos ciclos de carregamento. De maneira complementar, Souza (2023) avaliou o desempenho mecânico de misturas asfálticas quentes e mornas recicladas contendo 20% de RAP sob a abordagem da mecânica do dano contínuo viscoelástico, verificando que as misturas com RAP apresentaram valores mais elevados de C para um mesmo nível de dano S , comportamento associado à presença de material envelhecido, que confere maior rigidez às misturas.

A modelagem via S-VECD permite ainda integrar os efeitos do tempo, da temperatura e dos períodos de repouso, tornando-se uma ferramenta robusta para a previsão conjunta dos fenômenos de fadiga e regeneração. Ashouri (2014) utilizou o ensaio de fadiga à tração direta para caracterizar o comportamento regenerativo de misturas asfálticas por meio da mecânica do dano contínuo, introduzindo períodos de repouso em diferentes níveis de integridade. O autor observou descontinuidades nas curvas $C \times N$ e $C \times S$ associadas à aplicação desses repousos, possibilitando a quantificação da capacidade de regeneração do material.

Figura 11: Resultado da aplicação de períodos de repouso em mistura asfáltica representados no espaço C vs N para fins de avaliação de *healing*.

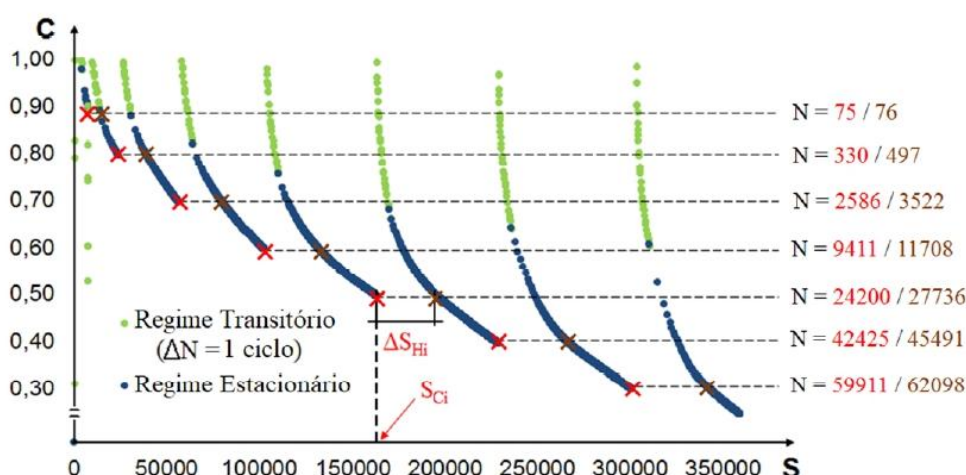


Fonte: Ashouri (2014).

Pivetta *et al.* (2020) propuseram um protocolo experimental aplicado ao ensaio de fadiga à tração direta com inclusão de períodos de repouso, no qual os efeitos de *healing* são representados por uma variável de estado de regeneração (H). Essa variável é incorporada a um modelo de quantificação do índice de regeneração (%HS) no espaço da curva característica de dano ($C-S$), apresentando elevado ajuste aos dados experimentais e indicando aumento significativo da vida de fadiga, mesmo com a aplicação de poucos períodos de repouso.

Adicionalmente, Almeida Júnior (2022) aplicou o modelo S-VECD para avaliar o efeito de agentes rejuvenescedores (éster de poliol e *green rejuvenator*) em misturas asfálticas 100% RAP, com validação por meio do software FlexPAVE™. Os resultados evidenciaram a eficácia dos rejuvenescedores na recuperação das propriedades viscoelásticas e na redução da rigidez das misturas envelhecidas, especialmente em temperaturas intermediárias e baixas, resultando em aumentos da vida à fadiga entre 12% e 16%.

Figura 12: Curva característica de dano com inclusão de períodos de repouso de 270 s, na temperatura de 30° C.



Fonte: Pivetta *et al.*, 2020.

2.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que o self-healing é um fenômeno intrínseco aos materiais asfálticos, amplamente reconhecido na literatura, porém lide conhecimento limitado, reforçando a relevância de estudos voltados à regeneração em misturas asfálticas recicladas. A utilização de material fresado em novas misturas, associada ao emprego de agentes rejuvenescedores, como os bio-óleos, tem demonstrado elevado potencial na restauração das propriedades reológicas do ligante envelhecido. Nesse contexto, o desenvolvimento de sistemas capazes de intensificar esse processo mostra-se promissor, tanto do ponto de vista socioambiental quanto na redução dos custos de manutenção e reabilitação de pavimentos.

Entretanto, os métodos de quantificação da autorregeneração em misturas asfálticas contendo agentes rejuvenescedores ainda apresentam limitações. O encapsulamento surge como uma alternativa relevante, ao possibilitar a liberação controlada dos rejuvenescedores em função da evolução das microfissuras no pavimento. Diante disso, a aplicação do modelo S-VECD tem se destacado na análise do comportamento à fadiga de misturas asfálticas, permitindo uma avaliação mais precisa da degradação estrutural e dos efeitos da regeneração. Sua aplicação em ensaios de fadiga à tração direta mostra-se fundamental para compreender a influência de variáveis como temperatura e tempo de repouso na recuperação do material.

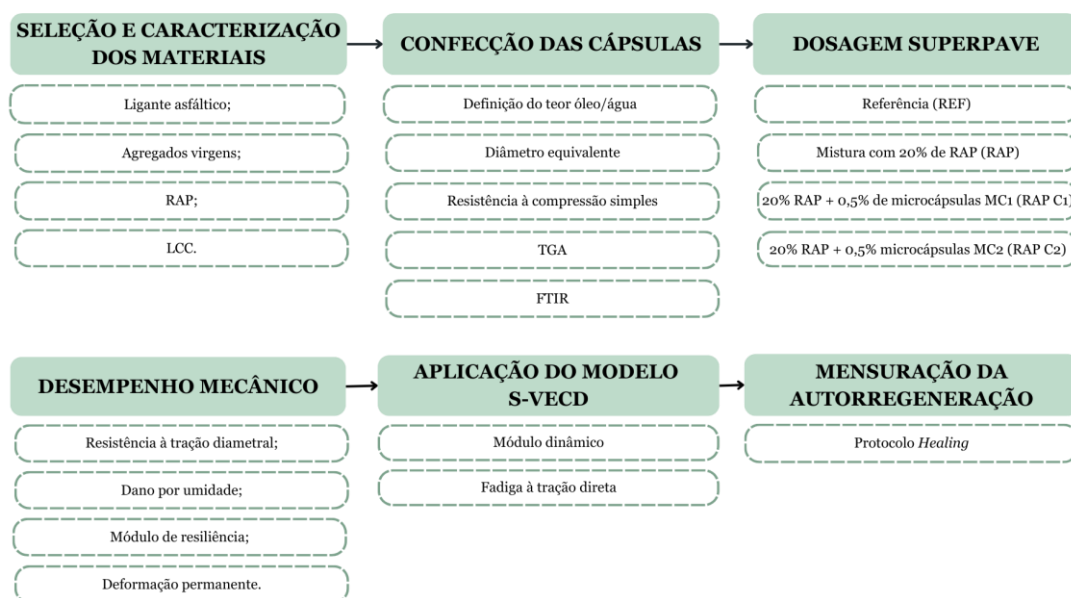
CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais empregados no estudo, bem como as especificações relativas às propriedades físicas do ligante asfáltico, dos agregados, do material fresado (RAP) e do LCC, além dos procedimentos adotados para a análise mecânica das misturas asfálticas.

A metodologia proposta encontra-se representada no fluxograma da Figura 13 e foi estruturada em seis etapas principais. A primeira etapa consistiu na seleção e caracterização dos materiais (ligante asfáltico, agregados, RAP e LCC), conforme as especificações das normativas técnicas vigentes. A segunda etapa refere-se à produção das cápsulas contendo o líquido da castanha de caju. A terceira etapa contemplou a dosagem das misturas asfálticas por meio da metodologia SUPERPAVE. A quarta etapa correspondeu à análise do desempenho mecânico das misturas. Na quinta etapa foi aplicado o modelo S-VECD e, por fim, a sexta etapa contemplou a execução do protocolo de mensuração da autorregeneração.

Figura 13: Fluxograma da pesquisa.



3.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa têm suas características especificadas nos tópicos seguintes.

3.1.1. Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado na pesquisa foi classificado como CAP 50/70, asfalto convencional habitualmente utilizado na região Nordeste, proveniente da empresa Rocha Cavalcante localizada no município de Campina Grande, Paraíba. O Quadro 1 apresenta os procedimentos e as respectivas normas usadas a fim de avaliar as características físicas e reológicas do ligante puro. Os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e *Performance Grade* (PG) foram realizadas com as amostras de ligante asfáltico antes e após o procedimento de envelhecimento à curto prazo (*Rolling Thin Oven Test* – RTFO). Adicionalmente, a resistência à deformação foi analisada utilizando o ensaio MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*). Os resultados dos ensaios descritos estão presentes na Tabela 2 e Figura 2.

Quadro 1: Ensaios de caracterização do ligante asfáltico

ENSAIO	NORMA
Penetração 0,1 mm (100g, 5s a 25°C)	ASTM D5/D5M: 2020
Ponto de amolecimento (°C)	ASTM D36/D36M – 14: 2020
Viscosidade Rotacional (cP)	ASTM D4402/D4402M: 2015
<i>Performance Grade</i> – PG (°C)	ASTM D6373: 2021
<i>Multiple Stress Creep Recovery</i> – MSCR	ASTM D7405:2020

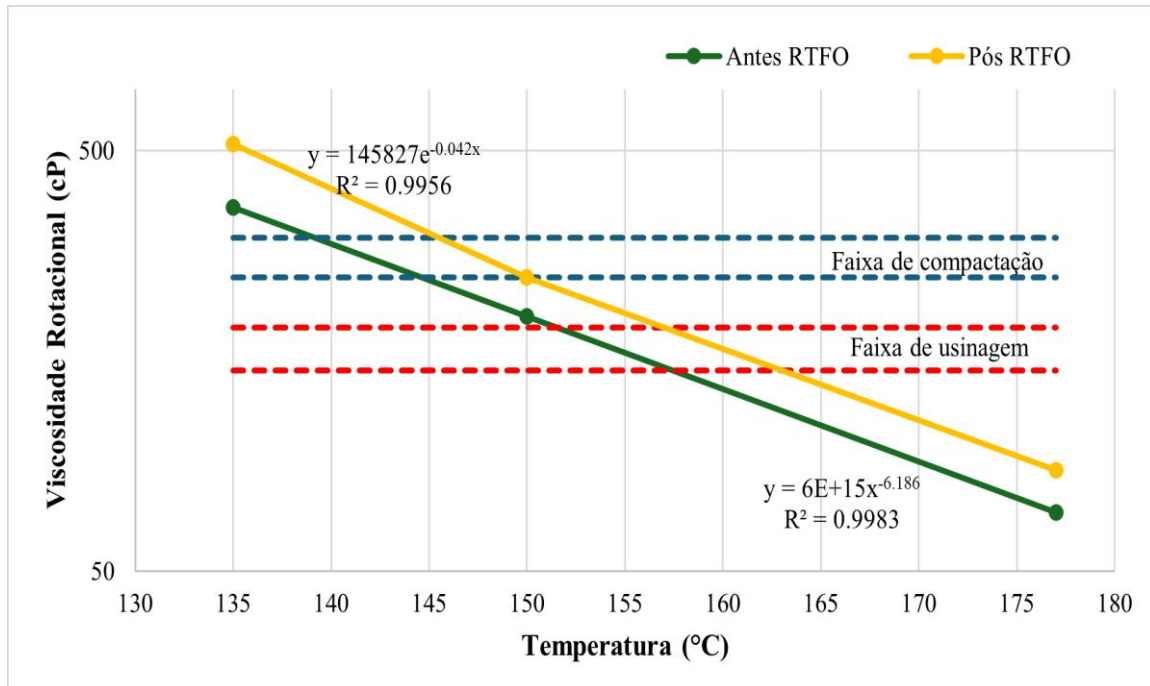
A partir dos resultados do ensaio de viscosidade foi elaborada a curva viscosidade vs temperatura do ligante (Figura 14), a qual permitiu determinar as temperaturas de usinagem e compactação empregadas na mistura de referência. Para a etapa de usinagem definiu-se a temperatura de 154 °C, de modo que a viscosidade do ligante permanecesse dentro da faixa de 170 ± 20 cP. Os agregados foram aquecidos a uma temperatura 10 °C superior à estabelecida para o ligante. Já a temperatura de compactação foi fixada em 142 °C, valor correspondente à faixa em que o ligante apresentou viscosidade de 280 ± 30 cP, faixas de temperaturas adotados de acordo com o relatório NCHRP 648 (2010). O ligante

analisado apresentou resultados satisfatórios, dentro dos limites estabelecidos pelas normas vigentes para o CAP 50/70. Tais resultados indicam que o material possui boa qualidade, apresentando propriedades adequadas para sua utilização em misturas asfálticas, inclusive em condições de serviço.

Tabela 2: Caracterização física e reológica do ligante asfáltico virgem antes e após RTFO

Antes RTFO		
ENSAIO	RESULTADO	ESPECIFICAÇÕES
Penetração 0,1 mm (100g, 5s a 25°C)	65,40	50 a 70
Ponto de Amolecimento (°C)	46,00	≥ 46
135°C	380,30	≥ 274
Viscosidade Rotacional	190,18	≥ 112
150°C		
177°C	70,54	57 a 285
PG máximo (°C)	66,0	-
Após RTFO – ASTM D 2872/12		
Penetração 0,1 mm (100g, 5s a 25°C)	41,60	-
Penetração retida	63,60	-
Ponto de Amolecimento	49,00	-
Variação do ponto de amolecimento	3,90	≤ 8
Variação de massa	0,41	≤ 0,5
135°C	517,73	-
Viscosidade Rotacional	249,48	-
150°C		
177°C	86,94	-
PG máximo (°C)	64,0	
Fluência e recuperação sob tensão múltipla – MSCR	Jnr diff (%)	-
	Jnr a 3,2 kPa	-
	Jnr a 0,1 kPa	-
	4,74	
	4,37	

Figura 14: Viscosidade do ligante virgem antes e após RTFO



3.1.2. Agregados virgens

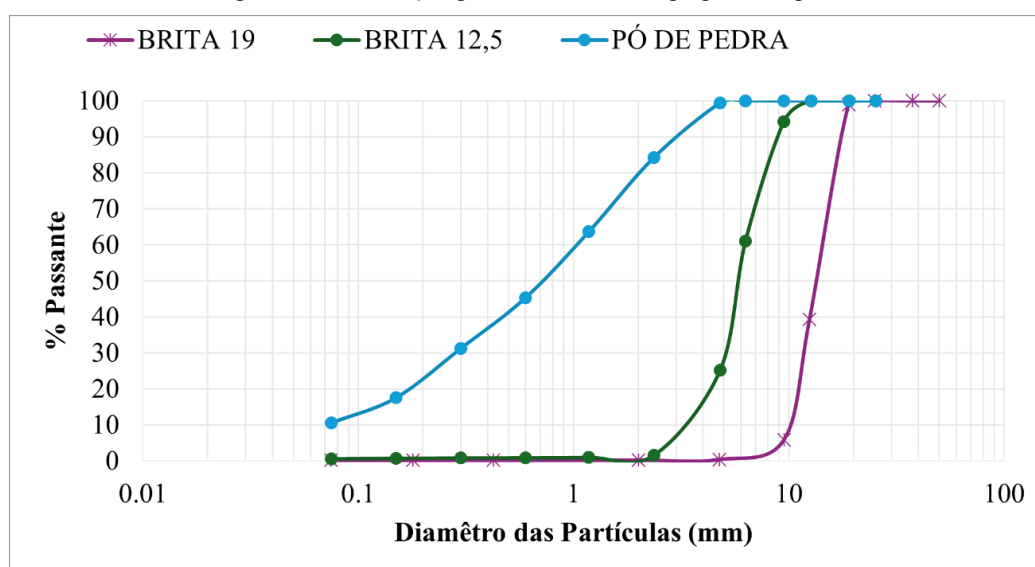
Para a pesquisa os agregados virgens empregados foram: brita 19,0 mm e 12,5 mm e pó de pedra, oriundos da pedreira Rocha Cavalcante, localizada no município de Campina Grande-PB. Como filer foi utilizado a cal hidratada, adquirida em comercio local de Campina Grande-PB.

Os resultados dos ensaios de massa específica real e aparente, absorção, índice de forma e abrasão Los Angeles indicaram conformidade com os limites normativos estabelecidos, conforme apresentado na Tabela 3. Além disso foi determinada a adesividade do ligante asfáltico ao agregado gráudo conforme a norma DNIT 078:1994, e observou-se desprendimento de ligante do agregado, sendo a adesividade considerada insatisfatória, o que resultou na utilização de dope (0,1% em massa de ligante), melhorador químico de adesividade ligante-agregado em todas as misturas. A distribuição granulométrica dos agregados gráudos e miúdos (Figura 15) apresenta, respectivamente, uma graduação uniforme e uma graduação densa.

Tabela 3: Ensaios para caracterização dos agregados.

ENSAIO	NORMA	LIMITES	RESULTADOS		
			Brita 19mm	Brita 12,5mm	Pó de pedra
Massa específica real (g/cm ³)		-	2,747	2,778	2,467
Massa específica aparente (g/cm ³)	DNIT 413:2021	-	2,716	2,717	2,457
Absorção (%)		≤ 2	0,440	0,801	0,172
Índice de forma	DNIT 424:2020	≤ 1	0,885	0,5771	-
Abrasão “Los Angeles”	DNER-ME 035:1998	≤ 55	21,08	19,13	-
Adesividade de agregado graúdo	DNER-ME 078:1994	-	N.S.	-	-

Figura 15: Distribuição granulométrica dos agregados virgens.



3.1.3. Reclaimed Asphalt Pavement – RAP

A caracterização do pavimento reciclado após a fresagem é fundamental para avaliar a integridade dos agregados e o envelhecimento do ligante asfáltico. O material utilizado, proveniente da BR-230/PB, foi previamente analisado por Macedo (2025) no Laboratório de Engenharia de Pavimentos e suas propriedades foram consideradas na preparação da mistura.

Para a determinação das propriedades físicas e reológicas do ligante envelhecido, procedeu-se à extração utilizando um extrator centrífugo (Rotarex) com tricloroetileno (ponto de ebulição de 87 °C). O teor de ligante presente no RAP foi verificado e correspondeu a 5,60%. Posteriormente, o ligante envelhecido foi submetido ao processo de recuperação em evaporador rotativo, operando a aproximadamente 60 °C por cerca de 2 horas, sob vácuo de 0,035 mmHg. Após a recuperação, o ligante foi mantido em estufa a vácuo para eliminar possíveis resíduos de tricloroetileno. A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, performance grade (PG) e MSCR, realizados no ligante envelhecido antes e após o procedimento RTFO.

Tabela 4: Caracterização física e reológica do ligante asfáltico envelhecido antes e após RTFO

ENSAIO	NORMA	RESULTADO
Penetração 0,1 mm (100g, 5s a 25°C)	ASTM D5/D5M:2020	27,00
Ponto de Amolecimento (°C)	ASTM D36/D36M – 14:2020	60,50
Viscosidade Rotacional	ASTM D4402/D4402M: 2015	135°C 1975,00
		150°C 985,00
		177°C 400,00
PG máximo (°C)	ASTM D6373:2021	82,00
Após RTFO – ASTM D 2872/12		
Penetração 0,1 mm (100g, 5s a 25°C)	ASTM D5/D5M:2020	5,00
Ponto de Amolecimento	ASTM D36/D36M – 14:2020	92,00
Viscosidade Rotacional	ASTM D4402/D4402M: 2015	135°C 13751,0
		150°C 5019,00
		177°C 936,00
PG máximo (°C)	ASTM D6373:2021	106,00

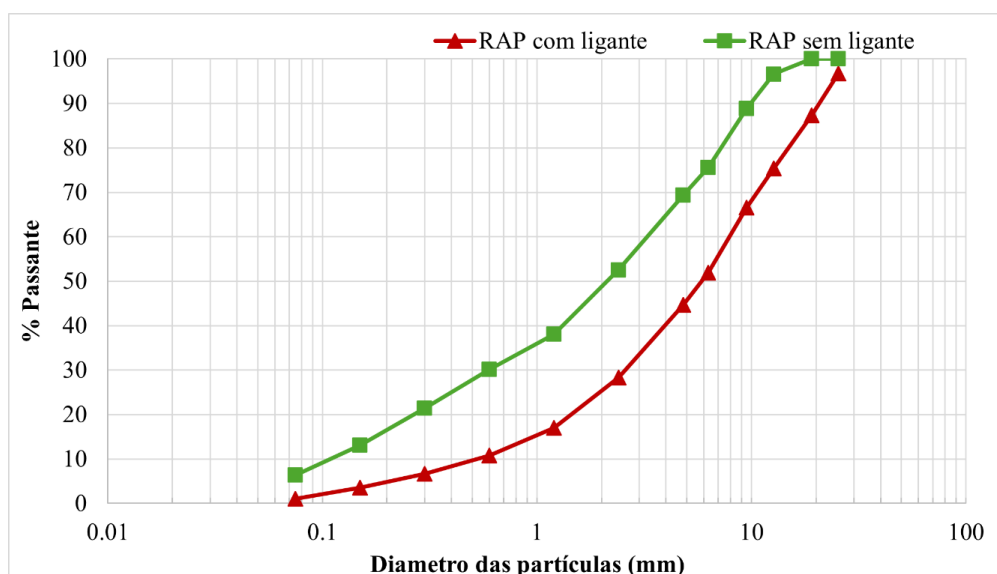
O ligante asfáltico do RAP apresentou uma temperatura máxima de PG de 82 °C. Sua elevada rigidez, corroborando com os estudos anteriores, foi evidenciada pelos altos valores de viscosidade, pelo baixo índice de penetração.

Na sequência, foram determinadas as massas específicas do RAP, incluindo a massa específica máxima teórica, também denominada densidade máxima teórica, obtida pelo método Rice, essencial para avaliar o desempenho estrutural do material em misturas asfálticas recicladas. O RAP foi utilizado considerando a ativação parcial do ligante envelhecido com o ligante virgem. Os ensaios foram realizados em conformidade com as normativas, e os resultados estão apresentados Tabela 5. O ensaio de granulometria foi realizado em duplicata, antes e após a extração do ligante (Figura 16).

Tabela 5: Caracterização do RAP.

ENSAIO	NORMA	RESULTADO
Determinação do Teor de Betume	ASTM D2172 3 05	5,60%
Massa Específica Máxima Medida - Gmm	ASTM D2041/D2041M-19	2,512 g/cm ³
Densidade Específica Efetiva G_{se}^{RAP}	Manual Técnico: “Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement	2,738 g/cm ³
Densidade Específica Aparente G_{sb}^{RAP}	in the Superpave Mix Design Method”	2,731 g/cm ³
Distribuição granulométrica	ASTM C136 C136M-14	-

Figura 16: Distribuição granulométrica do White RAP e Black RAP.



3.1.4. Líquido da castanha do caju (LCC)

O líquido da castanha do caju – LCC é um subproduto agroindustrial proveniente da extração da amêndoa do caju. O material foi doado pela empresa Onvit, localizada na cidade de Fortaleza – CE. A escolha deste material como agente rejuvenescedor deve-se ao fato de que o LCC apresenta resultados positivos quando utilizado na modificação de ligantes asfálticos.

A viscosidade do óleo foi avaliada por meio de ensaios em viscosímetro rotacional, seguindo os procedimentos da norma ASTM D7867 (2013), e os resultados estão apresentados na

Tabela 6. Observa-se que o LCC apresenta viscosidade decrescente com o aumento da temperatura, indicando maior fluidez sob aquecimento, próximo às condições de usinagem da mistura asfáltica. Além disso, a Tabela 7 apresenta as propriedades físico-químicas do LCC, fornecidas pela empresa doadora. O líquido se caracteriza por pH levemente neutro, favorável ao encapsulamento em alginato de cálcio, pois preserva a integridade da matriz gelificada durante a formação das cápsulas.

Tabela 6: Viscosidade do líquido da castanha do caju

ENSAIO	NORMA	RESULTADO (cP)
Viscosidade Rotacional	ASTM D4402/D4402M: 2015	25°C 202,28
		70°C 30,23
		140°C 16,27

Tabela 7: Propriedades físico-químicas do LCC

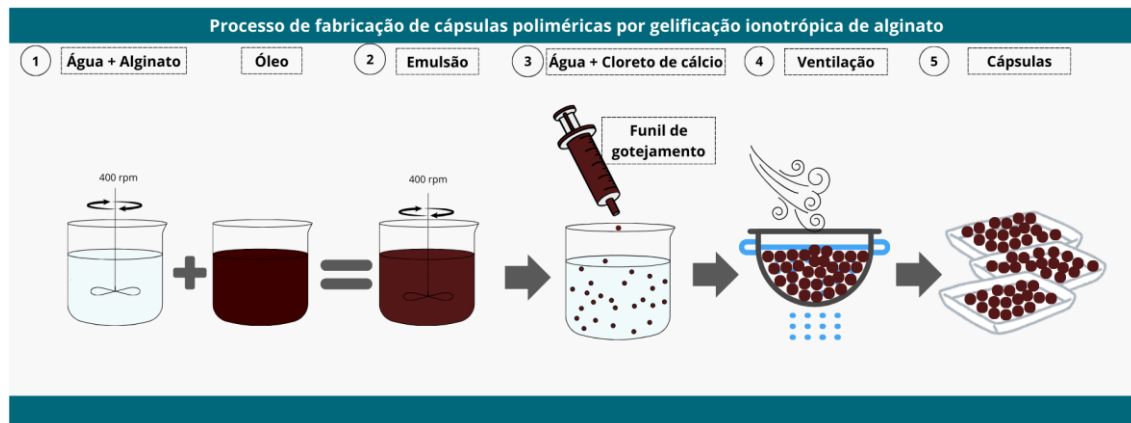
PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO LCC	
Estado físico	Líquido viscoso de cor castanho escuro ou preta
Odor	Característico
pH	6-8
Ponto de fulgor	230°C
Densidade (25°C)	0,943 – 0,968 g/ml
Umidade (% por peso)	Máximo 1

O estudo conduzido por Oliveira (2014) utilizou LCC técnico obtido no estado do Ceará (Brasil) e apresentou resultados de densidade variando entre 0,943 e 0,975, pH mínimo de 6,0, ponto de fulgor de 230°C e solubilidade não miscível em água. Ribeiro (2011), por sua vez, reportou valores de densidade entre 0,9272 e 0,9350, volatilidade de 3%, índice de acidez máximo de 5 e índice de iodo mínimo de 301.

3.2. CONFECCÃO DAS CÁPSULAS

As microcápsulas de líquido da castanha do caju foram produzidas por meio da metodologia de gelificação ionotrópica de alginato na presença de íons cálcio, conforme procedimento empregado por Micaelo, Al-Mansoori e Garcia (2016). Entretanto, foram realizadas adaptações no método original, relacionadas ao tipo de agente rejuvenescedor utilizado e à ordem de inserção dos materiais durante a preparação da emulsão, com o objetivo de adequar o processo às condições específicas dos materiais. O processo de encapsulação foi desenvolvido conforme as etapas descritas na Figura 17:

Figura 17: Fluxograma do processo de microencapsulamento



Preparação da emulsão: O sal aniônico alginato de sódio ($C_6H_7O_6Na$) foi adicionado gradualmente à água destilada e homogeneizado em agitador de baixo cisalhamento, à 400 rpm, até completa dissolução. Na sequência, o óleo foi incorporado a mistura, resultando na formação da emulsão. As proporções utilizadas encontram-se apresentadas na Tabela 8. O teor de alginato de sódio adotado foi de 12 g, valor inferior ao empregado no procedimento original (15 g), com o objetivo de reduzir a viscosidade da emulsão e

viabilizar o processo de gotejamento, uma vez que emulsões mais viscosas dificultam a formação adequada das esferas.

Tabela 8: Proporções utilizadas na formação das cápsulas.

Cápsula	Proporção (o/a)	Óleo (g)	Água (g)	Alginato de sódio (g)
MC – 0,15	0,15	78,0	522,0	12,0
MC – 0,20	0,20	99,00	501,0	12,0

Formação das cápsulas: A solução de cloreto de cálcio foi preparada com 2% de concentração. Dissolveu-se 14g do $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ em 700mL de água destilada à 20°C. O processo de formação das cápsulas, ocorreu ao gotejar a emulsão por meio de seringas na solução agitada em um agitador magnético, a fim de mantê-la em rotação constante para evitar que as gotas de emulsão se acumulassem.

Cura e Secagem: Ao término do gotejamento, as cápsulas foram lavadas em água destilada e submetidas a uma corrente de ar, entre 8 e 10 horas, para secagem. Após esse processo, observou-se redução no volume e escurecimento da coloração.

3.2.1. Diâmetro das cápsulas

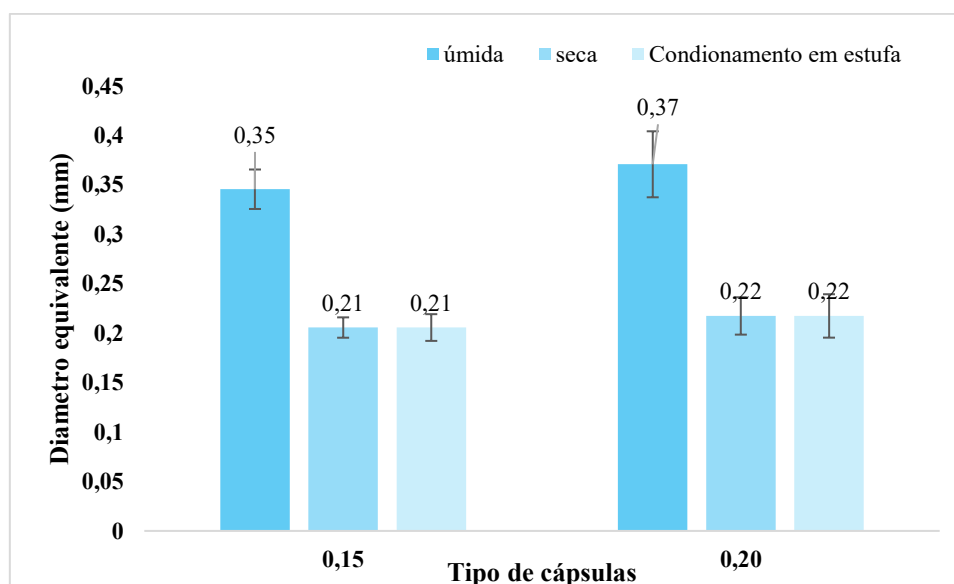
O diâmetro equivalente das cápsulas (Figura 18) foi determinado a partir de imagens obtidas com uma câmera digital de 50 MP de resolução, processadas no software de código aberto ImageJ®. Foram analisadas cerca de 25 unidades para cada tipo de cápsula. O software calculou a área individual de cada cápsula registrada na imagem. Para isso, utilizou-se a ferramenta de análise de partículas, que possibilita avaliar simultaneamente as 25 amostras de cada composição, desde que estejam suficientemente distantes entre si na imagem. Nessa etapa, o programa ajustou os contornos detectados e aproximou o formato ao de um círculo. Assim, a partir da área fornecida pelo software, aplicou-se a fórmula da área do círculo ($\pi D^2/4$) para estimar o diâmetro equivalente.

As cápsulas foram avaliadas em três condições: úmidas, secas e após condicionamento em estufa. A análise em estado úmido permitiu determinar suas dimensões imediatamente após a produção, considerando o efeito da presença de água. Em seguida, as cápsulas secas foram analisadas para verificar a influência da perda de umidade sobre o tamanho, identificando a redução volumétrica decorrente da

desidratação. Por fim, o condicionamento em estufa foi realizado para remover qualquer umidade residual e avaliar possíveis alterações dimensionais devido à contração ou expansão do material. Essas análises possibilitaram compreender de forma abrangente os efeitos da umidade e do tratamento térmico sobre as dimensões das cápsulas.

Os resultados mostraram que a razão óleo/água é o principal fator determinante do tamanho final. A diferença entre cápsulas úmidas e secas ocorre devido à evaporação da água, já que o cálcio-alginato é permeável à água, mas não ao óleo, provocando encolhimento das cápsulas (Al-mansoori, Norambuena-Contreras e García, 2018). As diferentes razões óleo/água refletem, portanto, a quantidade de óleo presente em cada cápsula. Macedo (2025) observou resultados semelhantes em cápsulas com óleo de algodão residual e ressaltou que o condicionamento em estufa não altera o tamanho das cápsulas secas, confirmando que estas já se encontram completamente desidratadas.

Figura 18: Diâmetro equivalentes das cápsulas



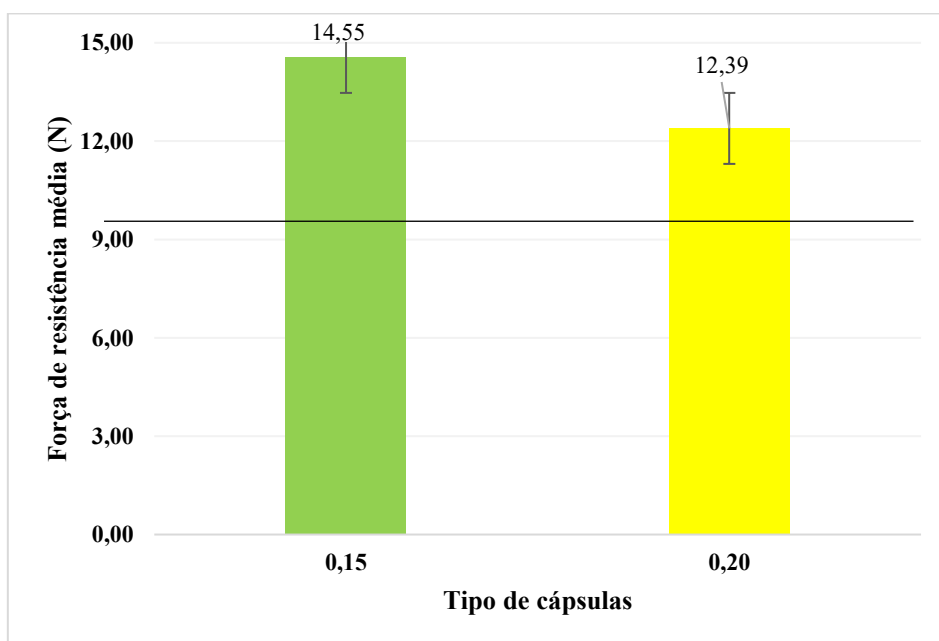
3.2.2. Resistência à compressão das cápsulas

A resistência à compressão das cápsulas foi determinada por meio do ensaio de compressão uniaxial. Para cada proporção avaliada, aproximadamente 15 cápsulas foram ensaiadas à temperatura ambiente (25 °C). Os ensaios foram realizados em uma prensa hidráulica *Shimadzu* com sistema servo-hidráulico, aplicando-se um carregamento

até a ruptura, a uma taxa constante de deslocamento de 0,5 mm/min. Durante o ensaio, foram registrados a força de compressão e as deformações correspondentes.

A resistência de pico das amostras foi adotada como parâmetro de avaliação e seus valores médios, juntamente com os desvios-padrão, estão apresentados na Figura 19. Observa-se que cápsulas com maior teor de agente rejuvenescedor em seu núcleo apresentaram menor resistência média à compressão, enquanto aquelas com menores teores exibiram comportamento oposto, em concordância com resultados reportados por Al-Mansoori *et al.* (2018). Além disso, as resistências médias obtidas superaram 10 N, atendendo aos requisitos mínimos para o preparo de misturas asfálticas durante os processos de usinagem e compactação (Garcia *et al.*, 2010; Norambuena-Contreras *et al.*, 2018).

Figura 19: Resistência de pico média das cápsulas.

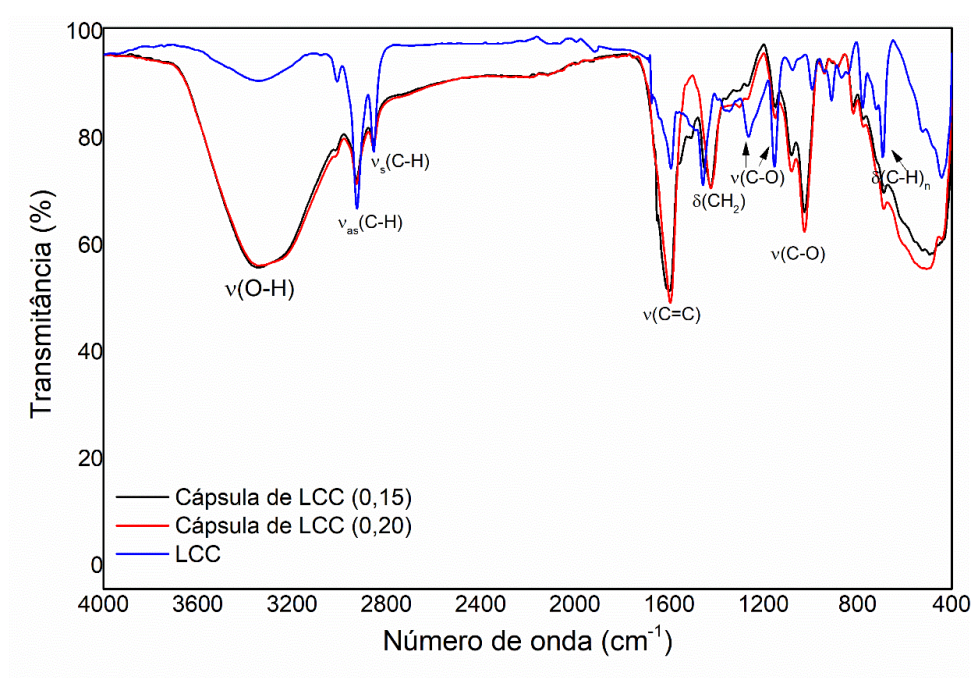


Barros (2020) avaliou a resistência à compressão de cápsulas contendo óleo de soja e óleo de soja residual, variando o teor de óleo incorporado às cápsulas. O autor observou que, após a aplicação da carga, as deformações apresentadas são predominantemente não elásticas, e que as cápsulas se rompem de forma gradual, acompanhadas por uma liberação intensa do agente rejuvenescedor.

3.2.3. Caracterização químicas das cápsulas

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para caracterização química das cápsulas produzidas neste estudo. Esta técnica consiste em identificar grupos funcionais característicos em amostras orgânicas e inorgânicas, por meio da análise das bandas de absorção relacionadas às vibrações moleculares. A análise é baseada na absorção de radiação eletromagnética na região do infravermelho médio (número de onda entre 4000 e 400 cm^{-1}). Os ensaios de FTIR foram realizados no Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e foram analisados os espectros do líquido da castanha do caju e das cápsulas de alginato de cálcio contendo o LCC (0.15 e 0.20) (Figura 20).

Figura 20: Espectros de FTIR para as cápsulas com líquido da castanha do caju



O espectro de FTIR obtido para o líquido da castanha de caju apresenta banda larga de estiramento uma banda larga na região entre 3600 e 3200 cm^{-1} , atribuída ao estiramento do grupo hidroxila (O-H), associada aos fenóis presentes no LCC. As bandas em torno de 2920 e 2850 cm^{-1} correspondem aos estiramentos assimétrico e simétrico de C-H, relacionados às longas cadeias hidrocarbonadas. A presença de insaturações é confirmada pela banda em aproximadamente 1600 cm^{-1} , atribuída ao estiramento C=C

do anel aromático, enquanto as bandas entre 1200 e 1000 cm^{-1} estão associadas às vibrações de estiramento C–O, típicas de fenóis e éteres fenólicos.

Ao comparar com o estudo conduzido por Uchoa (2024), observam-se pequenas diferenças na intensidade e no alargamento das bandas, que podem ser atribuídas à variação na origem do LCC, ao grau de oxidação natural ou às condições experimentais do ensaio, como o preparo da amostra e a resolução do equipamento, sem que isso caracterize alterações estruturais relevantes. Dessa forma, os espectros confirmam a mesma identidade química do LCC puro, com variações apenas de natureza quantitativa.

A análise por FTIR confirma a efetividade do encapsulamento do LCC na matriz de alginato de cálcio, uma vez que as principais bandas características do LCC são preservadas após o processo de encapsulamento. A manutenção das bandas de O–H, C–H, C=C e C–O nas cápsulas indica que o LCC permanece quimicamente estável e fisicamente encapsulado na matriz polimérica. A sobreposição e o leve deslocamento de algumas bandas sugerem a ocorrência de interações entre o óleo e a matriz de alginato de cálcio, evidenciando que o LCC foi efetivamente incorporado à rede iônica do polímero, e não apenas misturado fisicamente. Esse comportamento é fundamental para garantir que o rejuvenescedor mantenha sua funcionalidade ao ser liberado, assegurando sua eficácia na recuperação das propriedades do ligante asfáltico.

3.2.4. Propriedades térmicas das cápsulas

3.2.4.1. Análise termogravimétrica (TGA) e diferencial (DTA)

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica em que a massa de uma amostra é medida em função da temperatura quando a amostra é submetida a um programa controlado de temperatura. O ensaio permitiu avaliar a estabilidade térmica e os eventos de degradação do material em atmosfera oxidante, sendo realizado para o LCC e as cápsulas 0,15 e 0,20, a fim de verificar as mudanças nas propriedades físicas e químicas das microcápsulas de alginato com o aumento da temperatura.

As curvas termogravimétricas das cápsulas com proporções 0,15 e 0,20 apresentaram comportamento térmico semelhante, caracterizado por três estágios principais de perda de massa. Inicialmente, observou-se uma perda de massa de aproximadamente 5–6% até

cerca de 195–210 °C, atribuída à eliminação de umidade adsorvida e de compostos voláteis. A principal etapa de decomposição ocorreu entre 200 °C e 400 °C, com reduções de massa de aproximadamente 68% para as cápsulas 0,15 e 61% para as cápsulas 0,20, associadas à degradação térmica do alginato de cálcio e à pirólise dos constituintes orgânicos do LCC. Em seguida, na faixa de 400 °C a 600 °C, verificou-se uma segunda etapa de perda de massa, da ordem de 18% para as cápsulas 0,15 e 21% para as cápsulas 0,20.

Figura 21: Curva TGA e DTA versus temperatura da cápsula (0,15)

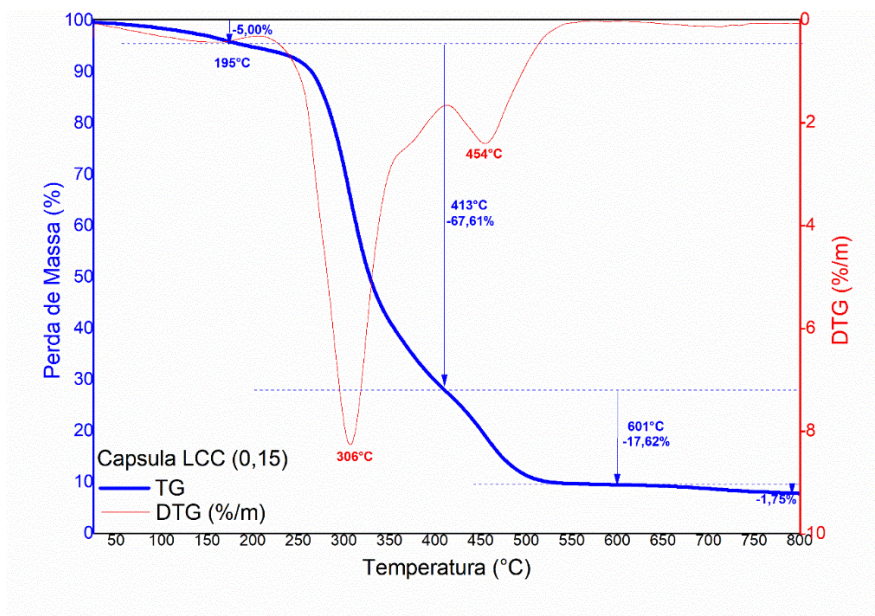
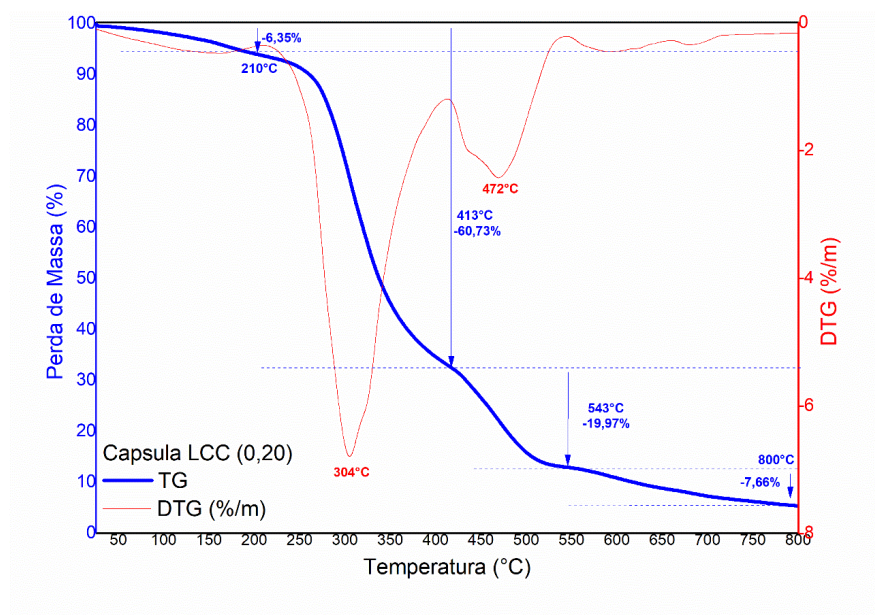


Figura 22: Curva TGA e DTA versus temperatura da cápsula (0,20)



A curva derivada das amostras evidencia um pico principal de degradação em 300°C, que corresponde à maior taxa de perda de massa, indicando o ponto de máxima decomposição do alginato e do LCC encapsulado. Um segundo evento térmico é observado em torno de 450-470°C, indicando a oxidação de resíduos carbonosos e compostos aromáticos condensados, possivelmente com caráter exotérmico. A presença desses dois picos mostra que a degradação do material ocorre em múltiplas etapas, envolvendo inicialmente a decomposição da matriz polimérica e dos compostos voláteis, seguida pela oxidação das frações mais resistentes. Esse comportamento é típico de sistemas encapsulados orgânicos, nos quais a matriz polimérica e o óleo encapsulado degradam-se de forma sequencial, fornecendo informações importantes sobre a cinética e estabilidade térmica do material.

3.3. MÉTODOS

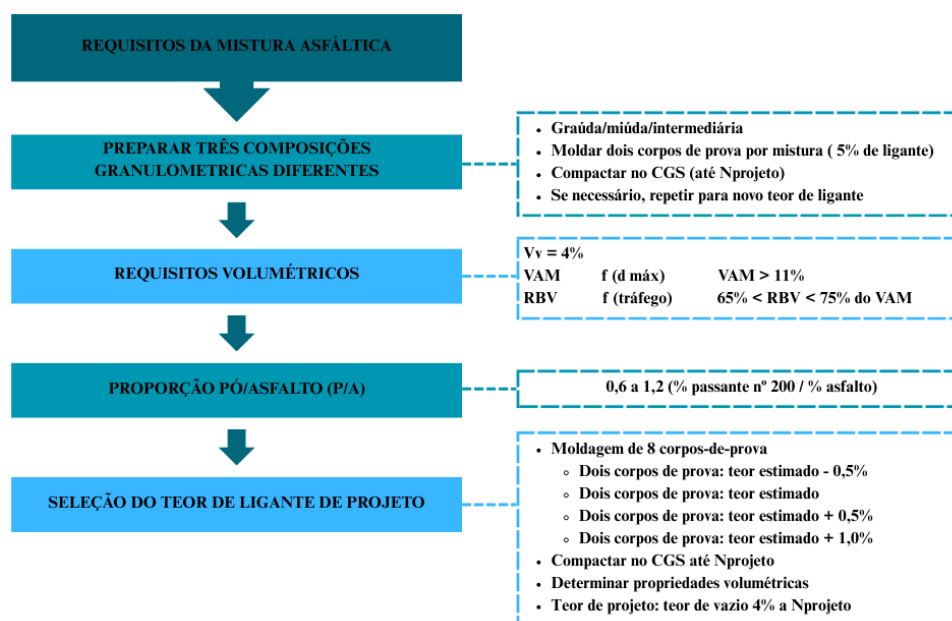
Este item resume os procedimentos adotados para a produção e dosagem das misturas asfálticas, incluindo a metodologia para a mistura de referência, reciclada, e a incorporação das cápsulas. Em seguida, são apresentados os métodos dos ensaios empregados para avaliação das propriedades mecânicas e na quantificação da capacidade de autorreparação das misturas asfálticas.

3.3.1. Dosagem SUPERPAVE

3.3.1.1. Dosagem da mistura asfáltica de referência

A metodologia utilizada de dosagem foi a SUPERPAVE, que determina que a partir de três composições granulométricas diferentes pode-se selecionar o teor ótimo de ligante e a distribuição granulométrica com um melhor desempenho. A faixa adotada foi a faixa B (DNIT 031:2024). A metodologia seguiu os seguintes passos para composição da mistura (Figura 23):

Figura 23: Fluxograma da dosagem SUPERPAVE



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

Passo 1: escolha de três composições granulométricas com materiais selecionados, no caso, brita 19,0 mm, brita 12,5 mm e pó de pedra (Figura 24). Nesse processo, acontece a ponderação da granulometria dos agregados em uma única granulometria. As proporções escolhidas para cada uma das três composições estão apresentadas na Tabela 9.

Figura 24: Faixas granulométricas adotadas na dosagem SUPERPAVE

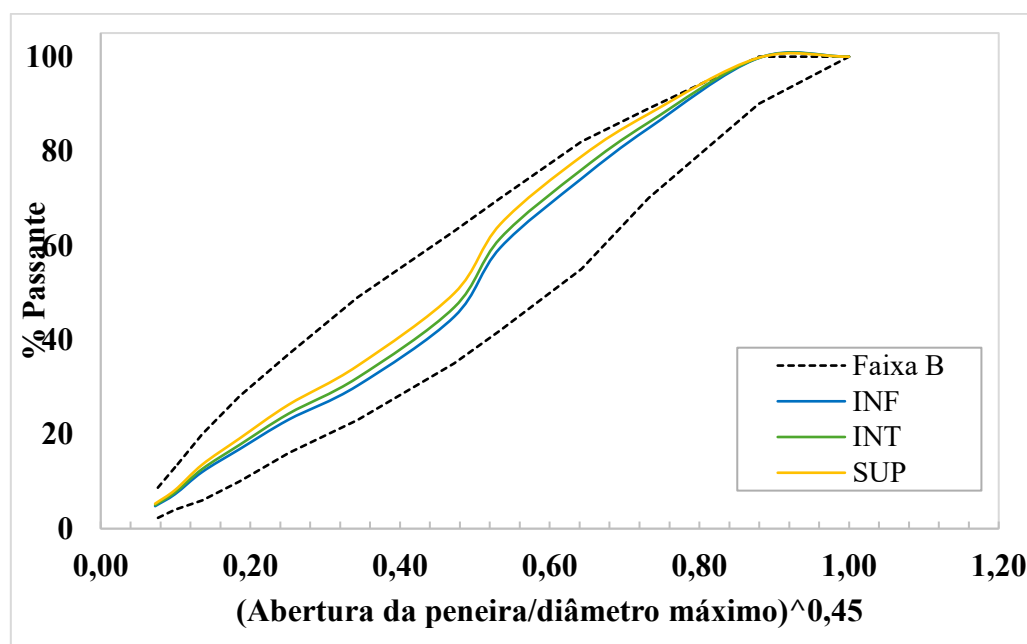


Tabela 9: Porcentagem de agregados

Composição	Materiais			
	Brita 19,0 (%)	Brita 12,5 (%)	Pó de pedra (%)	Cal (%)
Inferior	25	40	34	1
Intermediária	23	40	36	1
Superior	20	40	39	1

Passo 2: Nesta etapa, realizou-se a compactação dos corpos de prova (CPs), considerando um teor de ligante de 4% para cada mistura, com dois CPs produzidos por mistura. As amostras foram compactadas no Compactador Giratório Superpave (*SGC, do inglês Superpave Giratory Compactor*), seguindo a norma ASTM D6925:2015 e o número de giros de projeto definido. Em seguida, foram determinadas as propriedades volumétricas, incluindo o volume de vazios (Vv), os vazios no agregado mineral (VAM) e os vazios preenchidos com asfalto (RBV – relação betume/vazios), conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros volumétricos das misturas tentativas

Mistura tentativa	Ligante tentativa (%)	VAM (%)	RBV(%)	Vv (%)	%Gmm @Ninicial	%Gmm @Nmáximo
INFERIOR	4,00	12,38	67,69	6,24	88,16	97,64
INTERMEDIARIA	4,00	12,55	68,12	7,26	88,61	97,28
SUPERIOR	4,00	10,87	63,19	8,04	89,55	98,04

Passo 3: A curva inferior foi escolhida como referência para a confecção das misturas asfálticas, considerando que o teor de ligante deve proporcionar 4% de vazios no número de giros de projeto. Com base nisso, foi realizado o procedimento de seleção do teor de ligante de projeto, confeccionando-se CPs com teores correspondentes ao valor inicial +0,5% e +1,0%. Como o teor ótimo de ligante situava-se entre 4,5% e 5,0%, testou-se um valor intermediário de 4,7%, que resultou em um volume de vazios de 4,08%. Dessa forma, o teor de 4,7% foi adotado como ligante de projeto, conforme apresentado na Tabela 11. Os percentuais dos materiais foram ajustados de acordo com os valores estabelecidos na Tabela 12.

Tabela 11: Parâmetro volumétricos da mistura com teor de ligante ótimo.

Teor de ligante (%)	%Gmm (Nprojeto)	VAM (%)	Vv (%)	RBV (%)
4.5	94,77	11,87	4,69	67,69
5.0	95,77	11,37	3,15	63,85
4.70	95,17	11,67	4,08	65,00
Critérios SUPERPAVE	96%	≥13,00	4,00	65-75

Tabela 12: Percentuais em massa da mistura asfáltica.

Materiais				
CAP 50/70 (%)	Brita 19,0 (%)	Brita 12,5 (%)	Pó de pedra (%)	Cal (%)
4,70	23,83	38,12	32,40	0,95

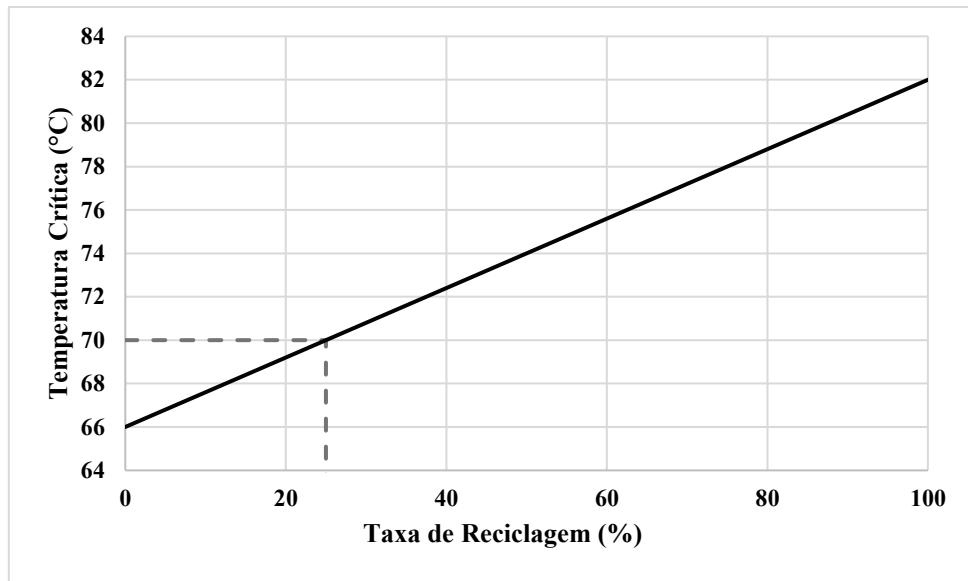
3.3.1.2. Dosagem da mistura asfáltica reciclada

Para a dosagem da mistura asfáltica reciclada, utilizou-se o *Blending Chart* do método SUPERPAVE para determinar o teor ideal de RAP a ser incorporado, relacionando a temperatura crítica dos ligantes virgem e envelhecido (Tabela 13), à taxa de reciclagem. Conforme apresentado na Figura 25, para uma temperatura de PG de trabalho de 70 °C, típica de regiões de clima quente (Faccin *et al.*, 2021), o teor estimado de RAP é de aproximadamente 25%. Entretanto, optou-se pela utilização de 20% de RAP, a fim de garantir maior segurança no desempenho da mistura, uma vez que o PG do ligante envelhecido pode apresentar variabilidade devido à presença de solvente residual resultante do processo de extração.

Tabela 13: temperatura crítica dos ligantes virgem e envelhecido.

LIGANTE	PG (°C)
CAP 50/70	66
RAP	82

Figura 25: Blend chart para a mistura reciclada.



Em seguida, para manter a similaridade da composição granulométrica em relação à mistura de referência, a mistura reciclada foi enquadrada segundo os requisitos da Faixa B do DNIT, conforme mostrado na Figura 26, com as porcentagens dos agregados detalhadas na Tabela 14.

Figura 26: Faixas granulométricas adotadas para a mistura reciclada.

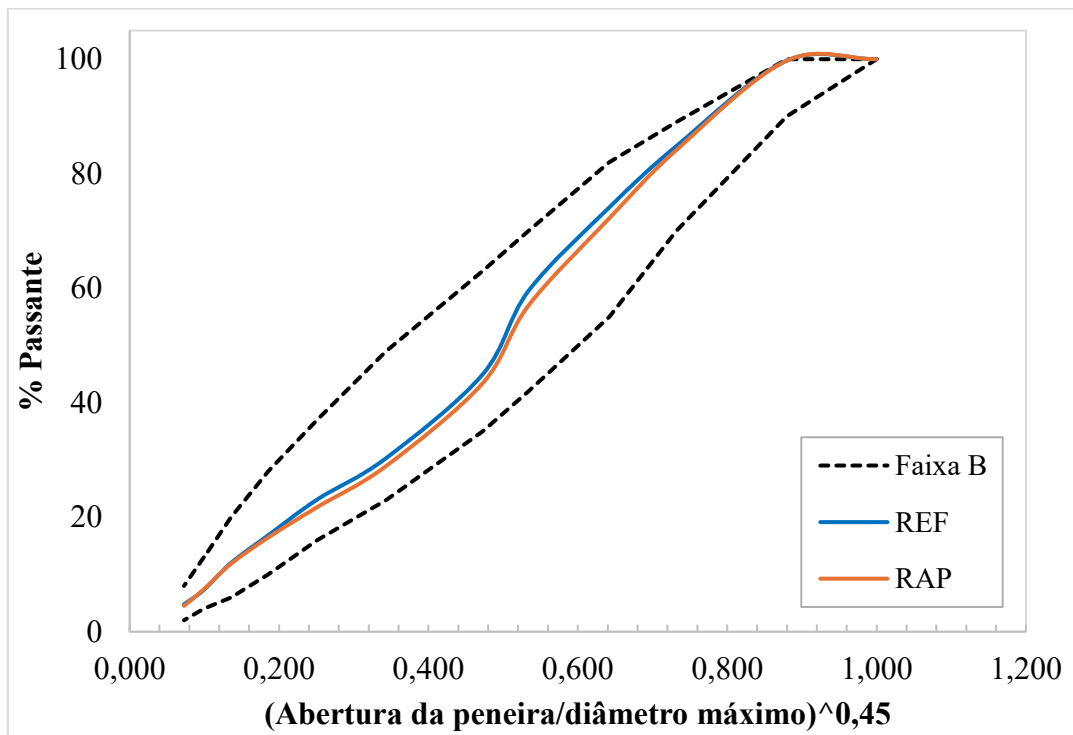


Tabela 14: Percentuais em massa das misturas asfálticas

Composição	Materiais				
	Brita 19,0	Brita 12,5	Pó de pedra	RAP	Cal
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
RAP	25,0	34,0	20,0	20,0	1,0
REF	25,0	40,0	34,0	0,0	1,0

O teor de ligante presente no RAP foi de 5,60% conforme apresentado no item 3.1.3. Considerou-se um cenário de ativação parcial, em que apenas uma fração do ligante envelhecido interage com o ligante virgem. Para determinar o teor de projeto da mistura, variou-se o teor ótimo da mistura de referência considerando diferentes níveis de ativação do ligante envelhecido no RAP (50%, 60%, 70% e 80%) apresentado na Tabela 15, buscando atender aos parâmetros volumétricos da metodologia SUPERPAVE. Optou-se pela taxa de ativação de 50%, o que resultou em um teor de ligante de projeto de 4,15%, valor que apresentou melhor adequação às especificações do SUPERPAVE, com exceção do VAM, representando uma redução de 0,55% em relação ao teor de ligante virgem. A Tabela 16 apresenta os percentuais dos materiais ajustados para este teor de ligante.

Tabela 15: Parâmetros volumétricos da mistura reciclada.

Níveis de ativação do ligante envelhecido	Teor de ligante (%)	%Gmm (Nprojeto)	VAM (%)	Vv (%)	RBV (%)
50,0	4,15	96,10	12,95	3,90	70,00
60,0	4,04	95,60	13,40	4,40	67,20
70,0	3,93	95,40	13,60	4,62	66,00
80,0	3,82	95,20	13,70	4,77	65,30
Critérios				4,00	65-75
SUPERPAVE	-	96%	≥13,00		

Tabela 16: Percentuais em massa da mistura asfáltica reciclada.

Materiais				
CAP 50/70 (%)	Brita 19,0 (%)	Brita 12,5 (%)	Pó de pedra (%)	Cal (%)
4,15	23,96	32,59	19,17	0,96

Com o objetivo de tornar mais clara a identificação das misturas avaliadas neste estudo, adotou-se uma nomenclatura específica baseada na composição e nos materiais utilizados. O Quadro 2 apresenta as siglas empregadas ao longo do texto, bem como a composição de cada mistura.

Quadro 2: Identificação das misturas utilizadas

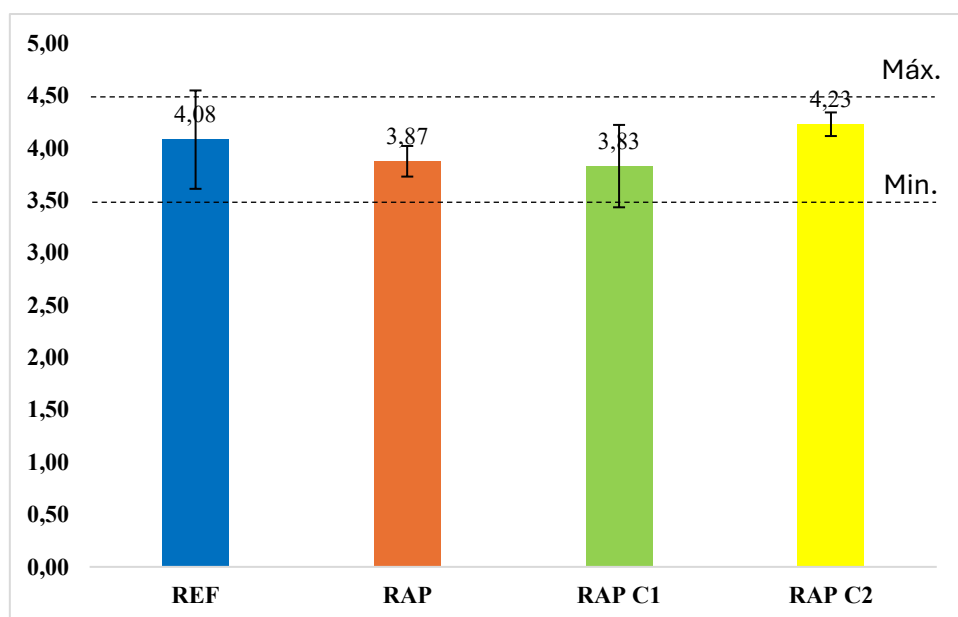
MISTURA	COMPOSIÇÃO
REF	Agregados virgens
RAP	Agregados virgens + 20% RAP
RAP C1	Agregados virgens + 20% RAP + cápsulas 0,15
RAP C2	Agregados virgens + 20% RAP + cápsulas 0,20

3.4. ADIÇÃO DAS CÁPSULAS À MISTURA

A incorporação das cápsulas nas misturas asfálticas seguiu a metodologia proposta por Norambuena-Contreras *et al.* (2019) e Macedo (2025) com 0,5% de cápsulas em relação à massa total da mistura asfáltica. A adição foi realizada após o processo de mistura dos agregados e do ligante asfáltico, misturadas manualmente até que fossem distribuídas por toda a mistura asfáltica. Em seguida, foram compactadas de forma semelhante as misturas sem capsulas.

Para verificar a influência da adição, os corpos de prova compactados com diferentes teores de cápsulas foram submetidos à avaliação dos parâmetros volumétricos, permitindo a comparação direta com a mistura de referência conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27: Volume de vazios das misturas asfálticas sem e com cápsulas.



A adição das cápsulas na mistura asfáltica não ocasionou modificações relevantes nas propriedades volumétricas, conforme apresentado na Figura 27. Em todas as formulações analisadas, os valores de volume de vazios permaneceram dentro das especificações estabelecidas ($4 \pm 0,5\%$). Devido à baixa proporção de cápsulas adicionadas, não foram necessários ajustes nas quantidades de agregados ou de ligante asfáltico.

3.5. AVALIAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS

Para avaliar o desempenho mecânico das misturas foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, resistência à deformação permanente, módulo dinâmico e vida de fadiga a flexão em quatro pontos e a tração direta uniaxial cíclico.

3.5.1. Resistência à tração por compressão diametral (RT)

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi conduzido conforme os procedimentos estabelecidos na norma DNIT 136/2018. O ensaio consistiu na aplicação de duas forças diametralmente opostas sobre o corpo de prova cilíndrico, por meio de frisos metálicos, gerando tensões de tração uniformes no plano diametral, perpendiculares à direção da carga. Foram ensaiados três corpos de prova (CPs), com diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm e altura entre 5,0 e 10,0 cm, sendo o resultado obtido pela média dos valores

medidos. A carga de ruptura registrada durante o ensaio foi convertida em resistência à tração (RT) por meio da Equação 15.

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

Em que,

σ : resistência à tração (MPa);

F: carga de ruptura (N);

D: diâmetro do corpo de prova (mm);

H: altura do corpo de prova (mm).

3.5.2. Dano por umidade induzida

O ensaio de Lottman modificado avaliou a influência da água em misturas asfálticas compactadas, considerando seu efeito deletério quando submetidas a carregamento em prensa mecânica. Esse ensaio é fundamental para avaliar a perda de adesão das partículas e a adesividade do ligante asfáltico.

Seis corpos de prova de cada grupo de mistura asfáltica foram moldados no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), com altura entre 50 mm e 70 mm e diâmetro de 100 ± 2 mm. Conforme a norma, os corpos de prova devem apresentar um volume de vazios de $7 \pm 1\%$. Para a realização do ensaio, os CPs foram divididos em dois grupos de três unidades cada: o primeiro passou por um processo de condicionamento por ciclos de gelo-degelo, enquanto o segundo não foi condicionado. O resultado do ensaio foi dado pela resistência retida à tração (RRT) de acordo com a Equação 16:

$$RRT (\%) = \frac{R_{Tc}}{R_{Tnc}} \times 100 \quad (16)$$

Em que,

R_{Tc} : Resistência à tração indireta das amostras condicionadas (Mpa);

R_{Tnc} : Resistência à tração indireta das amostras não-condicionadas (Mpa).

3.5.3. Módulo de resiliência (MR)

A rigidez da mistura foi determinada a partir do módulo de resiliência, conforme a normativa do DNIT 135/2018, sendo a relação entre a tensão horizontal resultante do carregamento repetido e a correspondente deformação horizontal recuperável após um determinado número de ciclos.

O ensaio foi realizado na prensa hidráulica UTM-25, consistindo na aplicação de pulsos de carga com frequência de 1 Hz, durante 0,1 segundos e intervalo de repouso de 0,9 segundos, incidindo no plano diametral vertical do corpo de prova. A tensão de tração transversal gerada foi monitorada, enquanto os LVDTs (Linear Variable Differential Transformers) registraram os deslocamentos horizontais. A carga aplicada correspondeu a 10% da resistência à tração do material. O resultado do ensaio foi expresso em MPa e obtido a partir da média dos valores medidos em três corpos de prova (CPs). Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente de 25 °C, adotando-se um coeficiente de Poisson igual a 0.3, valor amplamente empregado em estudos de mecânica dos pavimentos.

3.5.4. Resistência à deformação permanente – Flow Number (FN)

A resistência à deformação permanente foi determinada de acordo com a norma DNIT 184/2018. Foram utilizados 3 cp's com dimensões $150 \pm 2,5$ mm de altura e $100 \pm 2,0$ mm de diâmetro e volume de vazios de $7,0\% \pm 1,0\%$. Os corpos de prova foram condicionados a 60°C em estufa por no mínimo, 3 horas. Em seguida, foram sujeitos a um carregamento uniaxial cíclico em duas etapas: pré-carregamento em que se aplica uma carga de contato de compressão de $10,2 \pm 0,5$ kPa por 60 segundos; posteriormente, aplicou-se o carregamento cíclico de compressão por 1 segundo em duas partes: pulso de carga de 0,1 segundo, o mais próximo possível da forma $P = (1 - \cos \theta) / 2$, com magnitude variando desde a carga de contato até a carga máxima de $204,0 \pm 4,0$ kPa; e período de repouso de 0,90 segundo que deve manter a carga de contato. O ensaio teve como critério de parada 7.200 ciclos de carregamento ou 50.000 *microstrains* de deformação, em que as amostras invariavelmente já atingiram a ruptura.

3.5.5. Módulo dinâmico (MD)

O ensaio de módulo dinâmico foi realizado seguindo o método DNIT 416/2019 que teve como objetivo determinar as características elásticas e propriedades viscoelásticas lineares da mistura asfáltica. O ensaio consistiu na aplicação de um carregamento uniaxial de compressão semi-senoidal harmônico sobre um corpo de prova cilíndrico com dimensões de $150 \pm 2,5$ mm de altura e $100 \pm 2,0$ mm de diâmetro e volume de vazios de $5,5\% \pm 0,5\%$.

Para atingir o objetivo de obter as propriedades da mistura no regime viscoelástico linear, o ensaio foi realizado com deformação controlada ($50 \mu\epsilon$ e $75 \mu\epsilon$). Para executar o ensaio, foram utilizados dois cp's para cada grupo e ensaiados em quatro temperaturas (4°C , 20°C e 40°C) e seis frequências (25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz e 0,1 Hz). O módulo dinâmico $|E^*|$ compreendeu o valor absoluto do módulo complexo – relação entre tensão e deformação durante o carregamento senoidal contínuo, ao qual corresponde à razão entre a tensão máxima (σ_0) e a deformação axial recuperável máxima (ϵ_0).

3.5.6. Fadiga à tração direta uniaxial

O ensaio de fadiga à tração direta uniaxial foi realizado seguindo a normativa da AASHTO TP 107/2014. Os corpos de prova foram moldados no CGS com dimensões iniciais de 170 mm de altura de 100 mm de diâmetro com $5,5\% \pm 0,5\%$ de volume de vazios. Em seguida, os corpos de prova foram serrados aproximadamente 20 mm do topo e da base, resultando em um corpo de prova com dimensões finais de 130mm de altura e 100 mm de diâmetro. O corte das extremidades teve como objetivo homogeneizar o volume de vazios nas regiões próximas à base e topo do corpo de prova moldado no CGS, além de proporcionar uma melhor distribuição das tensões durante a execução do ensaio.

Posteriormente, os corpos de prova foram colados às placas superior e inferior utilizando um adesivo epóxi de baixa fluidez, aplicado 24 horas antes do início do ensaio. Para assegurar o alinhamento adequado das amostras – condição fundamental para evitar tensões excêntricas – foi utilizado um gabarito de posicionamento. O ensaio foi realizado utilizando o equipamento AMPT, no qual se aplicou uma deformação cíclica senoidal ao corpo de prova, com amplitude constante e frequência de 10 Hz. De acordo com a norma,

o ensaio deve ser conduzido à temperatura de 21 °C, entretanto, optou-se por realizá-lo a 25 °C devido à limitação da capacidade da célula de carga do equipamento, visando obter uma condição de menor rigidez no material.

Os ensaios foram realizados sob diferentes níveis de deformação, correspondentes a 130, 150 e 180 μ . A deformação axial foi monitorada por meio de extensômetros. Durante os testes foram registrados os valores de módulo dinâmico, ângulo de fase, tensão, deslocamento do atuador, deformação e temperatura. O critério de ruptura foi definido a partir da redução do ângulo de fase.

Inicialmente, foi realizado o procedimento chamado de *fingerprint*, onde uma pequena carga foi aplicada ao corpo de prova com deformações entre 50 μ e e 75 μ e controlado pelos extensômetros, para determinar o módulo dinâmico sob as mesmas condições do ensaio de fadiga (10 Hz e 25°C). O procedimento teve como objetivo corrigir a variabilidade entre as amostras, equalizando as diferenças de rigidez entre o módulo complexo e as amostras utilizadas no ensaio de fadiga, e permitindo o cálculo do *Dynamic Modulus Ratio* (DMR). Em seguida, após aproximadamente 20 minutos, as amostras foram submetidas ao ensaio de fadiga, no qual o atuador foi programado para alcançar um deslocamento de pico constante em cada ciclo de carga. Para determinar a deformação do atuador, dividiu-se o deslocamento do atuador pela altura do corpo de prova e a deformação do corpo de prova foi determinada pela razão entre o deslocamento medido pelos LVDTs acoplados e comprimento entre os sensores (70 mm). Embora a deformação imposta pelo atuador permaneça em tração durante todo o ensaio, a resposta de tensão apresenta ciclos alternados de tração e compressão, em virtude do comportamento viscoelástico do material.

3.6. MENSURAÇÃO DA AUTORREGENERAÇÃO

3.6.1. Aplicação do modelo S-VECD

A aplicação do modelo S-VECD foi realizada em duas etapas: a caracterização do comportamento viscoelástico linear e a definição da curva característica de dano. Inicialmente, o módulo dinâmico ($|E^*|$) e o ângulo de fase (δ) das misturas asfálticas foram determinados no ensaio de módulo dinâmico na AMPT, considerando frequências

de carregamento entre 25 e 0,1 Hz e temperaturas de 4 °C, 20 °C e 40 °C. Para a construção da curva mestra, os resultados foram transladados por meio do fator de deslocamento (aT), obtendo-se as frequências reduzidas (f_R). A norma DNIT 416/2019 estabelece que a curva mestra do módulo dinâmico seja ajustada por um modelo *sigmoidal* (Equação 17), enquanto os fatores de deslocamento sejam representados por uma função polinomial de segunda ordem (Equação 18). Os valores de módulo dinâmico obtidos serviram de base para a análise do dano viscoelástico contínuo das misturas.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(f_R)}} \quad (17)$$

$$\log(a_T) = a_1(T^2 - T_R^2) + a_2(T - T_R) + a_3 \quad (18)$$

Em que:

$|E^*|$ é o módulo dinâmico;

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

f_R é a frequência reduzida; aT é o fator de deslocamento;

T é a temperatura do ensaio (°C);

T_R é a temperatura de referência, para a qual será feita a translação (°C);

a_1 e a_2 são os coeficientes de ajuste.

Os resultados do módulo dinâmico foram convertidos em módulo de relaxação com base nos princípios da viscoelasticidade, utilizando técnicas propostas por Schapery e Park (1999). O módulo de armazenamento (E'), obtido experimentalmente em função da frequência angular (ω_R) (Equação 19), pode ser representado por uma série de Prony (Equação 20), cujos coeficientes são utilizados para calcular o módulo de relaxação $E(t)$ no domínio do tempo (Equação 21), descrevendo o comportamento viscoelástico linear das misturas.

$$E'(\omega_r) = |E^*(\omega_r)| \times \cos(\varphi(\omega_r)) \quad (19)$$

$$E'(\omega_r) = E_\infty + \sum_{i=1}^m \frac{\omega_r^2 p_i^2 E_i}{\omega_r^2 p_i^2 + 1} \quad (20)$$

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^m E_i e^{\frac{-t}{P_i}} \quad (21)$$

Em que:

E' é o módulo de armazenamento;

E^* módulo dinâmico;

ω_r é a frequência angular reduzida;

ϕ é o ângulo de fase;

E_∞ é o módulo elástico;

E_i é o módulo do elemento de Maxwell i e ρ_i tempo de relaxação;

$E(t)$ é o módulo de relaxação.

Os resultados do módulo de armazenamento (E') foram previamente ajustados por uma função sigmoïdal (Equação 22) antes de serem representados na forma de série de Prony, procedimento que, segundo Kim (2009), melhora o ajuste do módulo de relaxação.

$$\log(E') = k + \frac{\log(\max E') - k}{1 + e^{\delta + \gamma \log(f_R)}} \quad (22)$$

Em que:

máx E' é o valor máximo que E' pode assumir, de acordo com as características da mistura, como vazios do agregado mineral e relação betume-vazios;

k , δ e γ são os coeficientes de ajuste.

Os dados de viscoelasticidade em forma de série de Prony, o *fingerprint* para correção da variabilidade das amostras e os resultados experimentais de fadiga à tração direta foram utilizados em planilhas do Excel para aplicação das equações do modelo S-VECD. Esses dados permitiram analisar a evolução do dano por fadiga ao longo dos ciclos de carregamento e prever a falha do material. Durante os cálculos, os dados brutos foram processados e consolidados em um formato único, possibilitando a geração de gráficos de módulo dinâmico, ângulo de fase e ciclos de carga. Na etapa seguinte, monitorou-se a integridade do material e a acumulação de danos. Para que a curva característica de dano represente uma propriedade intrínseca do material, independentemente da carga e da temperatura, as curvas obtidas em diferentes níveis de deformação devem se sobrepor. Como essas curvas derivam de dados experimentais, aplicou-se um modelo matemático de ajuste, utilizando uma função do tipo potência (Equação 23).

$$C(S) = 1 - C_{11}SC^{12} \quad (23)$$

Em que:

C_{11} e C_{12} são parâmetros de ajuste.

3.6.2. Protocolo *Healing*

A caracterização do efeito de regeneração viscoelástica é baseada em uma adaptação do ensaio de fadiga à tração direta proposto por Nascimento (2015). Nesta metodologia, são incluídos períodos de repouso durante a aplicação do carregamento, definidos com base em níveis específicos do módulo inicial da mistura. O critério de aplicação desses períodos é determinado pela evolução do módulo de rigidez, monitorado em tempo real durante o ensaio. Para abranger diferentes estágios de dano, os valores de índice de integridade (C) utilizados foram 0,9, 0,8, 0,7, 0,6, 0,5, 0,4, 0,3, 0,2 e 0,1. O módulo dinâmico inicial, usado como referência, é obtido em um teste preliminar realizado à mesma temperatura, com carregamento cíclico de 10 Hz e deformação de 60 *microstrain*, suficientemente baixa para evitar qualquer dano à mistura.

O estudo de Pivetta *et al.* (2020) avaliou a regeneração de misturas asfálticas considerando diferentes períodos de repouso e temperaturas. Os resultados mostraram que tanto a duração do repouso quanto a temperatura afetam diretamente a capacidade de regeneração das misturas. Entre as condições testadas, um período de repouso de 270 segundos a 30 °C, proporcionou a maior recuperação da integridade do material, sendo, portanto, a situação mais adequada para avaliar de forma eficaz o efeito da regeneração.

O protocolo de *healing* adotado neste trabalho utilizou uma temperatura de 25 °C, mesma temperatura do ensaio de fadiga convencional e o período de repouso foi de 270 segundos, fundamentado na relação entre tempo e temperatura em materiais viscoelásticos. Os intervalos de repouso foram definidos como períodos de repouso reduzidos, com sobreposições nas áreas de transição de temperatura, garantindo consistência mesmo diante de variações nos fatores de mudança entre diferentes composições. O cálculo do período de repouso (PR) reduzido foi simplificado pela relação direta entre o tempo físico (p) e o *shift factor* (a_T) (Equação 24) permitindo ajustar o período de repouso real de cada mistura de forma comparável entre diferentes temperaturas e materiais. Os valores obtidos de cada mistura estão apresentados na Tabela 17.

$$\xi = \frac{t}{a_T} \quad (24)$$

Em que:

ξ é 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.

Tabela 17: Períodos de repouso reduzidos nas condições de ensaio.

Mistura	Temperatura (°C)	PR (s)	<i>Shif-factor</i>	PR reduzido (s)
REF	25,0	270	0,24	1125,0
RAP			0,22	1227,0
RAP C1			0,23	1174,0
RAP C2			0,24	1125,0

Para quantificar a regeneração no espaço C versus S, no qual é representado o comportamento intrínseco do material, foi utilizado o índice de regeneração proposto por Ashouri (2014). O autor também propõe três índices distintos para a avaliação do healing: com base na pseudo-rigidez do material (C), na variação do parâmetro de dano (S) e na variação do número de ciclos (N). Neste estudo, adotou-se o índice baseado na variação do parâmetro de dano (S), conforme apresentado na Equação 25.

$$\%H_s = \frac{\Delta S}{s_0} \times 100 \quad (25)$$

Em que:

$\%H_s$ = índice de regeneração, calculado a partir de S (%);

S_0 = dano do corpo de prova no momento de aplicação do período de repouso;

ΔS = variação de S entre pontos de mesma integridade de repouso.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

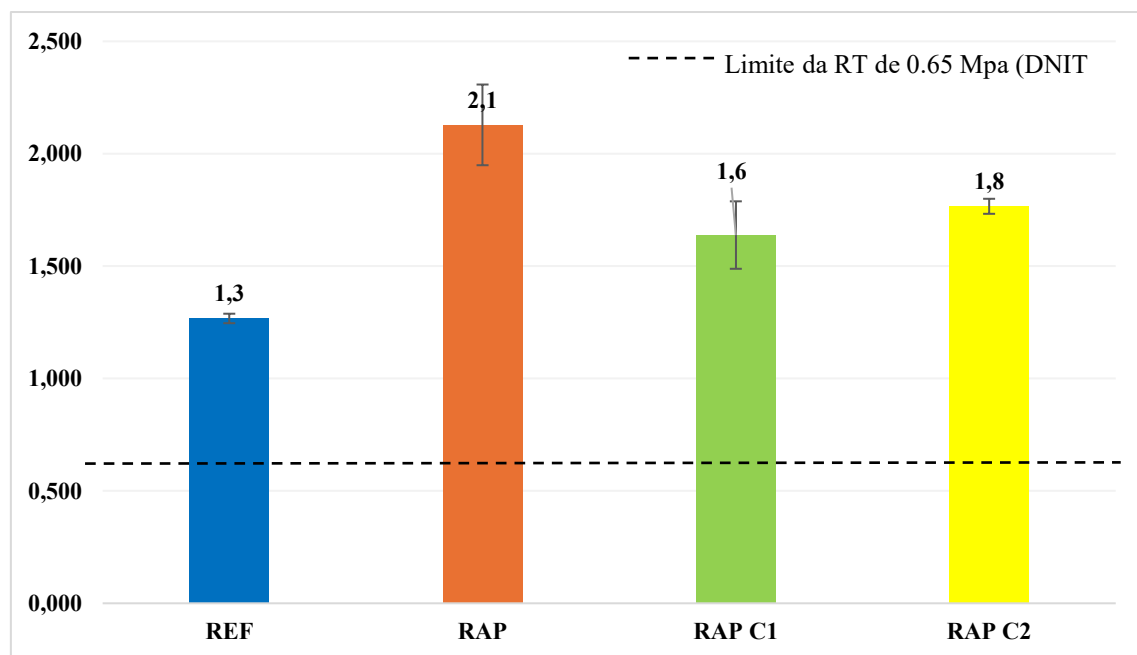
Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados das propriedades mecânicas e a capacidade de autorregeneração das misturas asfálticas.

4.1. AVALIAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS

4.1.1. Resistência à tração por compressão diametral (RT)

A Figura 28 apresenta os valores médios da resistência à tração por compressão diametral (RT) dos quatro grupos de misturas asfálticas avaliados, acompanhados dos respectivos desvios-padrão. Observa-se que todas as misturas apresentaram valores superiores à tensão mínima de 0,65 MPa estabelecida pela especificação de serviço para misturas asfálticas (DNIT 031/2024).

Figura 28: Resistência à tração direta por compressão diametral.



A análise de variância (ANOVA) de fator único, realizada com nível de significância (α) de 5%, indicou efeito estatisticamente significativo sobre os valores de RT entre as misturas. O valor de F calculado (26,92) foi superior ao valor crítico (4,07) e o valor de p foi inferior a 0,05 ($p = 0,00016$). Esses resultados indicam que há diferença

estatisticamente significativa entre pelo menos dois grupos, justificando a aplicação do teste de Tukey para comparação múltipla das médias, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18: Resultado do teste Tukey para comparação múltipla das médias dos valores de resistência à tração das misturas.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,137152	3	0,379051	26,91994	0,000156	4,066181
Dentro dos grupos	0,112645	8	0,014081			
Total	1,249798	11				
Tukey						
MQ dentro dos grupos				0.0141		
q tabelado				4.5300		
DMS				0.3103		
Comparação	Diferença entre as médias			Significativo		
REF × RAP	0,861201701			Sim		
REF × RAP C1	0,37097158			Sim		
REF × RAP C2	0,499013291			Sim		
RAP × RAP C1	0,490230121			Sim		
RAP × RAP C2	0,36218841			Sim		
RAP C1 × RAP C2	0,128041711			Não		

DMS = diferença mínima significativa, gl = grau de liberdade, MQ = quadrados médios, SQ = soma dos quadrados.

Os resultados do teste de Tukey evidenciaram diferenças estatisticamente significativas entre a mistura de referência e todas as misturas modificadas (RAP C1, RAP C2 e RAP), indicando que as modificações aplicadas promoveram melhorias na resistência. Além disso, a mistura RAP apresentou valores médios estatisticamente superiores às misturas RAP C1 e RAP C2. Por outro lado, não foi verificada diferença estatisticamente significativa entre as misturas RAP C1 e RAP C2, sugerindo que o aumento do teor de cápsulas, dentro do intervalo avaliado, não resultou em ganhos relevantes de resistência.

A mistura RAP apresentou o maior valor de resistência à tração, resultado esperado devido à presença do ligante envelhecido, que confere maior rigidez e resistência ao material (Oliveira *et al.*, 2022). Por outro lado, a incorporação das microcápsulas na mistura reciclada reduziu a resistência à tração, com diminuições de 23 % em RAP C1 e 17 % em RAP C2, possivelmente em razão da liberação do óleo durante os processos de usinagem e compactação. Comportamento semelhante foi observado por Macedo (2025), que incorporou óleo de algodão encapsulado em misturas recicladas com 20 % de RAP, para avaliar a capacidade de regeneração do material.

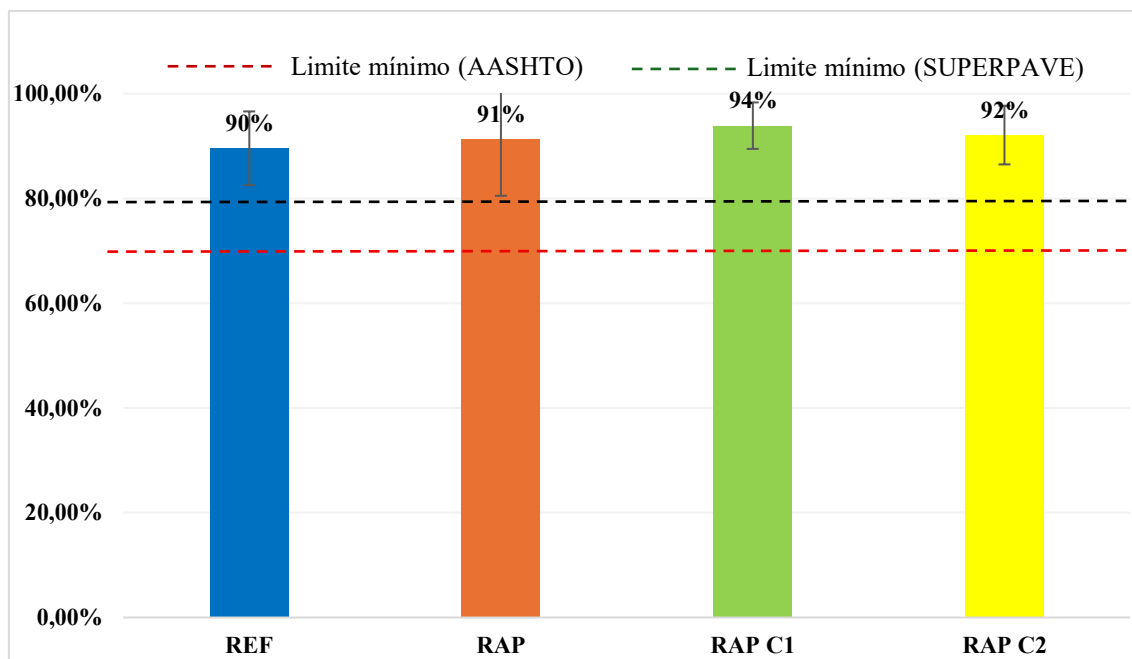
Oliveira (2014) analisou misturas asfálticas modificadas com líquido da castanha do caju antes e após o envelhecimento e verificou que, de modo geral, o envelhecimento aumentou os valores de resistência. No entanto, as misturas asfálticas modificadas com 2 % de LCC não enrijeceram da mesma forma que as misturas convencionais. Os resultados indicam que o LCC provavelmente contribuiu para a redução da resistência das misturas envelhecidas, tanto em estufa (em misturas soltas e compactadas) quanto em ensaios de envelhecimento natural.

4.1.2. Dano por umidade induzida

A Figura 29 apresenta os valores médios de resistência retida à tração indireta (RRTI) das misturas asfálticas avaliadas. De acordo com as normas DNIT 031 (2024) e AASHTO T283 (2021), o valor mínimo de RRTI estabelecido para misturas asfálticas é de 70%. Por sua vez, a metodologia SUPERPAVE adota um critério mais rigoroso, estabelecendo um limite mínimo de 80% de RRTI para assegurar a resistência das misturas ao dano causado pela água. Observa-se que todas as misturas analisadas atenderam aos requisitos mínimos de 70% e 80% de RRTI, indicando adequado desempenho quanto à resistência ao dano por umidade.

O estudo de Suzuki *et al.* (2023) investigou o comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com elevados teores de RAP, sem a incorporação de agentes rejuvenescedores, e observou que o aumento do teor de RAP resultou em redução da resistência ao dano por umidade. Esse comportamento reforça a importância do uso de agentes rejuvenescedores como estratégia para mitigar os efeitos do envelhecimento do ligante e melhorar o desempenho mecânico desse tipo de mistura.

Figura 29: Resistência retida à tração indireta das misturas asfálticas.



Silva *et al.* (2024) investigaram o efeito da incorporação de cápsulas em misturas asfálticas, avaliando seu impacto nas propriedades mecânicas do material. Os agentes rejuvenescedores utilizados na confecção das cápsulas foram a borra de soja e o ácido graxo derivado do óleo de soja. Os resultados indicaram que a adição de cápsulas pode contribuir para o aumento da resistência ao dano por umidade das misturas asfálticas, dependendo de sua composição e da proporção incorporada à mistura.

Joseph e Bindu (2024) avaliou os efeitos do líquido da castanha do caju (LCC) em misturas asfálticas mornas, nas quais o material foi incorporado como modificador do ligante. Os resultados referentes à resistência ao dano por umidade demonstraram que a adição de LCC proporcionou desempenho superior em relação à mistura de referência. Em condição não envelhecida, a mistura modificada apresentou RRTI de 97,5%, enquanto a mistura convencional alcançou 83,0%. Tendência semelhante foi observada após o envelhecimento, com valores de 99,2% para a mistura com LCC e 79,7% para a mistura de referência. O autor atribui esse comportamento às propriedades físico-químicas do LCC, especialmente à presença de cadeias laterais alifáticas longas e hidrofóbicas, que intensificam a adesão entre o ligante asfáltico e os agregados na presença de água. Como consequência, a incorporação de LCC ao ligante asfáltico

contribuiu para aumentar a resistência ao descolamento e melhorar a durabilidade da mistura frente à ação da umidade.

A análise de variância (ANOVA) de fator único, realizada com nível de significância (α) de 5%, não indicou efeito estatisticamente significativo sobre os valores de RRTI entre as misturas. O valor de F calculado (0.119) foi inferior ao valor crítico (4.07) e o valor de p foi superior a 0,05 ($p = 0.9462$). Esses resultados indicam que a variabilidade entre as médias dos grupos não é estatisticamente relevante. Ainda assim, procedeu-se à aplicação do teste de Tukey, cujos resultados mostraram que todas as diferenças entre as médias dos pares de misturas foram inferiores à diferença mínima significativa (DMS), confirmando a ausência de diferenças estatisticamente significativas entre as médias. Portanto, pode-se afirmar que as misturas asfálticas apresentaram desempenho estatisticamente equivalente quanto à resistência ao dano por umidade, conforme apresentado na Tabela 19.

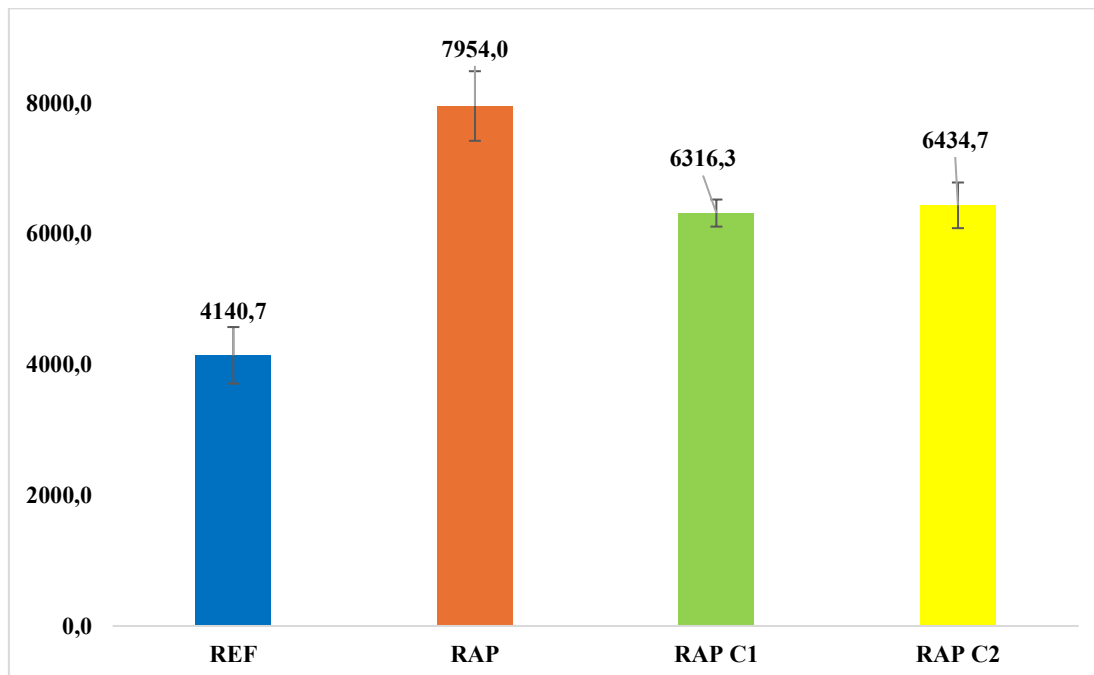
Tabela 19: Resultado do teste Tukey para comparação múltipla das médias dos valores de resistência ao dano por umidade das misturas.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,002546	3	0,000849	0,119204	0,946253	4,066181
Dentro dos grupos	0,056954	8	0,007119			
Total	0,0595	11				
Tukey						
MQ dentro dos grupos				0,0071		
q tabelado				4,5300		
DMS				0,2207		
Comparação	Diferença entre as médias			Significativo		
REF × RAP	0,016486612			Não		
REF × RAP C1	0,040715127			Não		
REF × RAP C2	0,022680226			Não		
RAP × RAP C1	0,024228515			Não		
RAP × RAP C2	0,006193613			Não		
RAP C1 × RAP C2	0,018034902			Não		

4.1.3. Módulo de Resiliência (MR)

A Figura 30 apresenta os valores médios do módulo de resiliência das misturas asfálticas avaliadas. Observa-se que a incorporação de RAP resultou em aumento do módulo de resiliência, enquanto as misturas asfálticas recicladas com adição de cápsulas apresentaram redução desse parâmetro. O aumento expressivo do módulo de resiliência das misturas recicladas em relação à mistura convencional (REF) pode ser atribuído ao elevado grau de envelhecimento do ligante presente no RAP, que confere maior rigidez ao material, corroborando com os resultados de resistência à tração. Esse comportamento está de acordo com os resultados observados por Suzuki (2019), que associou a maior rigidez das misturas, especialmente aquelas com altos teores de RAP, à elevada oxidação do ligante reciclado. A autora também destaca que o processo de usinagem em temperaturas elevadas contribui para a ativação do ligante residual presente no material reciclado, intensificando o efeito de aumento de rigidez da mistura. Por outro lado, verificou-se uma tendência de redução da rigidez com a incorporação das cápsulas, aspecto que favorece o desempenho à fadiga das misturas asfálticas.

Figura 30: Módulo de resiliência das misturas asfálticas.



A análise de variância (ANOVA) de fator único, realizada com nível de significância (α) de 5%, indicou efeito estatisticamente significativo sobre os valores de módulo entre

as misturas. O valor de F calculado (46.51) foi superior ao valor crítico (4.07) e o valor de p foi inferior a 0,05 ($p = 0.000021$). Esses resultados indicam que há diferença estatisticamente significativa entre pelo menos dois grupos, sendo assim foi a aplicação do teste de Tukey para comparação múltipla das médias, conforme apresentado na

Tabela 20.

Tabela 20: Resultado do teste Tukey para comparação múltipla das médias dos valores de módulo de resiliência das misturas asfálticas.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	22156350,9167	3	7385450	46,5172	0,0000208	4,066181
Dentro dos grupos	1270146,0000	8	158768.3			
Total	23426496,9167	11				
Tukey						
MQ dentro dos grupos			158768.2500			
q tabelado			4,5300			
DMS			1042,1240			
Comparação	Diferença entre as médias			Significativo		
REF × RAP	3813,3333			Sim		
REF × RAP C1	2175,6667			Sim		
REF × RAP C2	2294,0000			Sim		
RAP × RAP C1	1637,6667			Sim		
RAP × RAP C2	1519,3333			Sim		
RAP C1 × RAP C2	118,3333			Não		

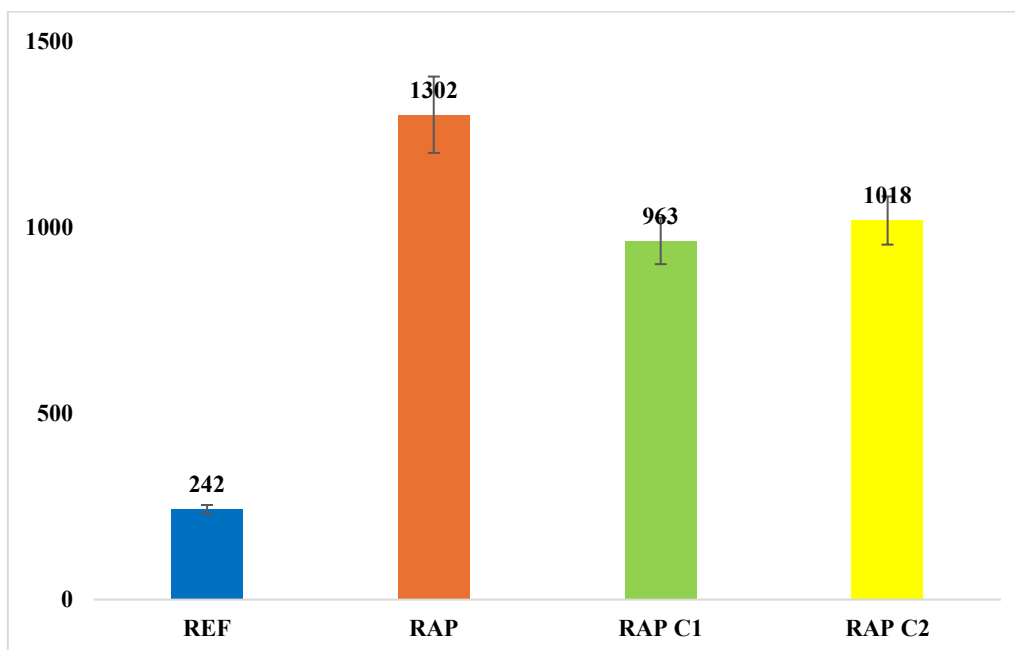
Os resultados do teste de Tukey indicaram diferenças estatisticamente significativas entre a mistura de referência (REF) e todas as misturas recicladas, evidenciando que a incorporação de RAP promoveu aumento da rigidez das misturas. Em contrapartida, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as misturas contendo cápsulas, o que indica comportamento mecânico semelhante entre elas. Esse resultado pode estar associado à ruptura parcial das cápsulas durante as etapas de usinagem e compactação, a qual pode aumentar a fluidez do ligante asfáltico e, consequentemente,

reduzir ligeiramente a rigidez da mistura. Ressalta-se que a ausência de diferença significativa entre essas misturas não implica falta de interação do óleo com o ligante, uma vez que o agente rejuvenescedor não foi incorporado diretamente ao ligante, mas sim de forma encapsulada, indicando que nem todas as cápsulas se romperam durante o processo.

4.1.4. Deformação permanente (*Flow Number*)

A Figura 31 apresenta os valores médios do *Flow Number* das misturas asfálticas avaliadas. Observa-se que as misturas recicladas apresentaram maior resistência à deformação permanente quando comparadas à mistura REF. O aumento dessa resistência foi de aproximadamente 437% para a mistura RAP em relação à mistura REF, indicando um comportamento mais rígido. Esse ganho está associado ao aumento do módulo de resiliência das misturas recicladas, o que se refletiu diretamente na maior resistência à deformação plástica. Por outro lado, a incorporação das cápsulas resultou em redução do FN das misturas recicladas, com diminuições de 26% e 22% para as misturas contendo cápsulas 0.15 e 0.20, respectivamente, evidenciando a influência do efeito rejuvenescedor na redução da rigidez do material.

Figura 31: Deformação permanente das misturas asfálticas.



As misturas asfálticas foram produzidas considerando um nível de tráfego médio ($10^6 \leq N \leq 10^7$), conforme os critérios da metodologia SUPERPAVE, devem apresentar valores de (FN) compreendidos entre ≥ 100 e < 300 ciclos, de acordo com Nascimento (2014). A mistura de referência apresentou desempenho limitado à deformação permanente, sendo adequada apenas para tráfego baixo a médio, enquanto a incorporação de RAP elevou o FN indicando maior resistência ao afundamento plástico e adequação a níveis de tráfego mais elevados. Entretanto, Melo Neto (2025) destaca que essas classificações são baseadas em condições normais de tráfego, que consideram velocidades superiores a 60 km/h, vias sem interseções, ausência de terceira faixa e temperaturas máximas moderadas do revestimento asfáltico. Além disso, misturas mais rígidas tendem a apresentar maior resistência ao afundamento plástico, mas podem se tornar mais suscetíveis ao trincamento por fadiga.

Melo Neto (2025) observou aumentos de 142,38%, 1.132,12%, 869,54% e 591,39% no Flow Number com a incorporação de 15%, 56%, 63% e 70% de RAP, associados a 0%, 3%, 5% e 7% de óleo de babaçu, respectivamente, em comparação à mistura convencional. Entretanto, ao analisar as misturas RAP, verifica-se que o Flow Number diminui à medida que aumenta o teor de óleo de babaçu no ligante, evidenciando o efeito amolecedor do óleo sobre o material. Costa (2023) observou, a partir dos resultados do ensaio *Flow Number*, que o aumento dos teores de óleo de algodão, associado aos incrementos nos teores de RAP, promoveu elevação da resistência à deformação permanente das composições. Essa maior resistência pode estar relacionada à utilização do RAP, que aumenta a proporção de ligante envelhecido na mistura, contribuindo para o aumento da rigidez. Comportamento semelhante também foi observado por Arruda (2021).

A análise de variância (ANOVA) de fator único, realizada com nível de significância (α) de 5%, indicou efeito estatisticamente significativo sobre os valores de módulo entre as misturas. O valor de F calculado (46.51) foi superior ao valor crítico (4.07) e o valor de p foi inferior a 0,05 ($p = 3.92E-07$). Esses resultados indicam que há diferença estatisticamente significativa entre pelo menos dois grupos, sendo assim foi a aplicação do teste de Tukey para comparação múltipla das médias, conforme apresentado na Tabela 21.

O teste de Tukey evidenciou diferenças estatisticamente significativas entre a mistura de referência (REF) e todas as misturas modificadas, bem como entre a mistura RAP e as misturas com cápsulas (RAP C1 e RAP C2). As comparações entre a mistura RAP e as misturas recicladas com cápsulas (RAP C1 e RAP C2) também apresentaram diferenças estatisticamente significativas, com redução do Flow Number nas misturas encapsuladas. Esse comportamento sugere que a adição das cápsulas promove um efeito de redução da rigidez do sistema. Por outro lado, não foi identificada diferença estatisticamente significativa entre as misturas RAP C1 e RAP C2, indicando que o aumento do teor de cápsulas não proporcionou ganhos adicionais na resistência à deformação permanente.

Tabela 21: Resultado do teste Tukey para comparação múltipla das médias dos valores de deformação permanente a das misturas asfálticas.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1830608,2500	3	610202,8	130,5712	3,92E-07	4,066181
Dentro dos grupos	37386,6667	8	4673,333			
Total	1867994,9167	11				
Tukey						
MQ dentro dos grupos			4673,3333			
q tabelado			4,5300			
DMS			178,7932			
Comparação	Diferença entre as médias			Significativo		
REF × RAP	1059,3333			Sim		
REF × RAP C1	720,3333			Sim		
REF × RAP C2	775,3333			Sim		
RAP × RAP C1	339,0000			Sim		
RAP × RAP C2	284,0000			Sim		
RAP C1 × RAP C2	55,0000			Não		

O estudo de Macedo (2025) avaliou o efeito rejuvenescedor do óleo de algodão encapsulado em misturas contendo RAP. Os resultados indicam que o RAP contribui para o aumento da resistência à deformação permanente, enquanto as cápsulas podem potencializar esse efeito. Além disso, a eficácia das cápsulas parece depender de sua

composição e do teor de óleo, sendo observada melhor performance nas cápsulas com menor quantidade de óleo. Entretanto, diferentemente do observado por Macedo (2025), neste estudo a incorporação das cápsulas reduziu os valores de Flow Number, possivelmente devido à liberação parcial do óleo e à consequente diminuição da rigidez.

4.1.5. Módulo dinâmico

As curvas mestras do módulo dinâmico, à temperatura de referência de 20 °C, foram obtidas por meio de uma função sigmoidal. Os coeficientes resultantes dos ajustes das funções sigmoidais e das funções polinomiais utilizadas para a determinação dos fatores de deslocamento (*shift factors*) estão apresentados na Tabela 22. O parâmetro δ indica a posição da curva na escala logarítmica da frequência reduzida, enquanto o parâmetro α está associado à inclinação da curva e à transição do comportamento viscoelástico da mistura asfáltica. A Figura 32 apresenta a curva mestra ajustada do módulo dinâmico, enquanto a Figura 33 ilustra a curva mestra do ângulo de fase.

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

Misturas	Coeficientes da função polinomial do <i>shift-factor</i>			Coeficientes do modelo sigmoidal			
	a1	a2	a3	δ	A	β	y
REF	0,0007	-0,1593	2,9234	5,50	1,91	0,52	0,63
RAP	0,0011	-0,1824	3,2175	4,33	3,18	1,58	0,38
RAP C1	0,0006	-0,1563	2,8947	4,31	3,09	1,39	0,50
RAP C2	0,0008	-0,1618	2,9249	4,74	2,67	1,15	0,52

O módulo dinâmico e o ângulo de fase são parâmetros fundamentais para a avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas sob diferentes temperaturas e frequências de carregamento. O módulo dinâmico representa a rigidez do material e varia conforme as condições de ensaio, refletindo o caráter viscoelástico das misturas. De modo geral, observa-se que o módulo dinâmico diminui com o aumento da temperatura e aumenta com o acréscimo da frequência de carregamento, comportamento típico de materiais asfálticos. Esse efeito está associado à redução do tempo disponível para relaxação do material em frequências mais elevadas, enquanto, em baixas frequências, o

maior tempo de ciclo favorece a redistribuição de tensões e a recuperação viscoelástica, contribuindo para a ocorrência de mecanismos de healing.

Figura 32: Curvas mestras das misturas asfálticas na temperatura de referência.

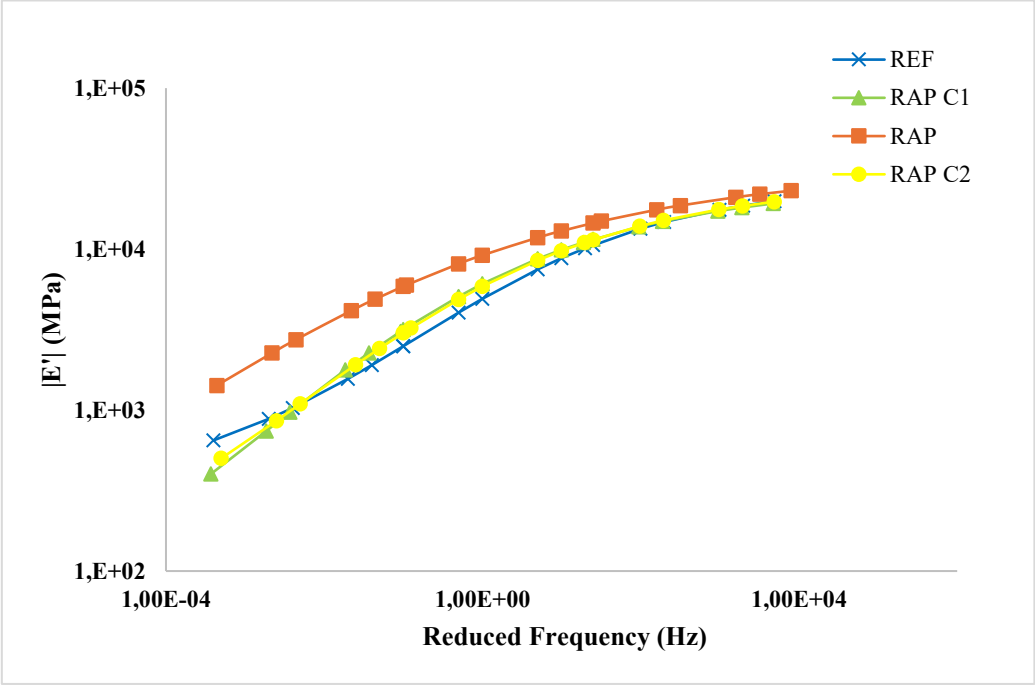
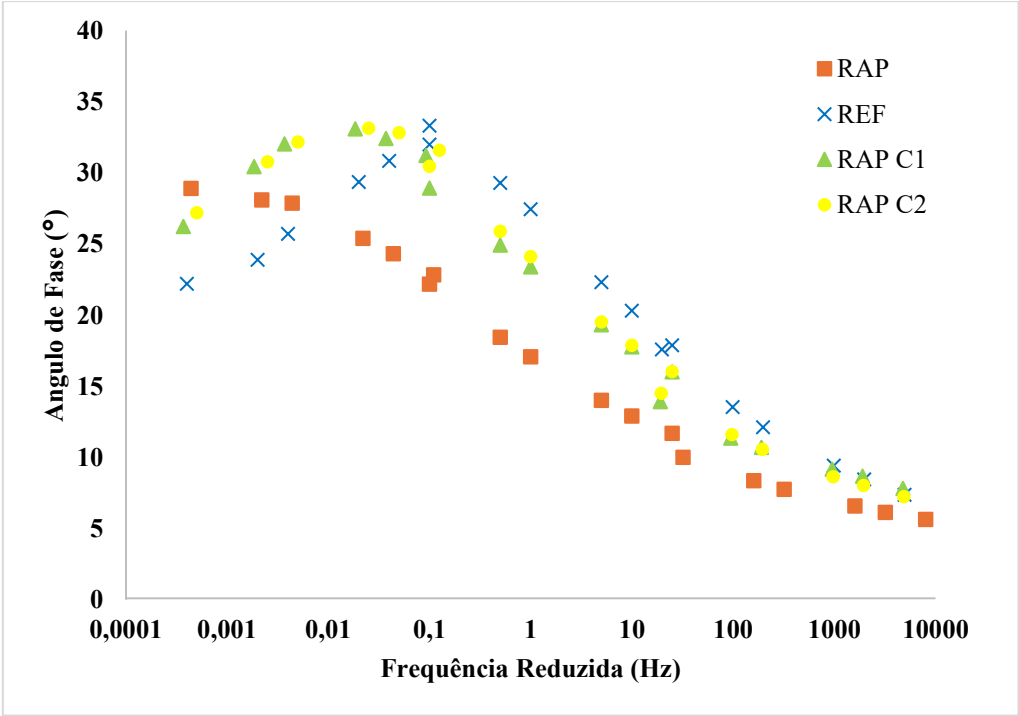


Figura 33: Curvas mestras de ângulo de fase das misturas asfálticas



A mistura RAP apresentou os maiores valores de módulo dinâmico na maior parte das frequências, evidenciando que o ligante envelhecido aumenta a rigidez da mistura. As misturas RAP C1 e RAP C2 apresentaram rigidez intermediária e próxima entre si, indicando que o aumento do teor de óleo não alterou significativamente o módulo. Observa-se ainda que, em baixas frequências, as curvas de RAP C1 e RAP C2 se aproximam da REF, enquanto em altas frequências se aproximam da RAP, sugerindo que o efeito das cápsulas depende do regime de carregamento.

As variações do ângulo de fase, assim como as observadas no módulo dinâmico, são mais evidentes em baixas frequências reduzidas (correspondentes a altas temperaturas) do que em altas frequências reduzidas (baixas temperaturas). Nessa faixa de altas temperaturas e baixas frequências, em que o comportamento da mistura é dominado pelo ligante, o valor máximo do ângulo de fase representa o limite do comportamento viscoso da mistura, influenciado por diversas características do material (Nemati *et al.*, 2020). Segundo Queiroz (2022), as baixas frequências estão associadas às deformações viscoelásticas e à ocorrência de deformação permanente, enquanto as frequências intermediárias estão relacionadas ao dano por fadiga.

Na aplicação do modelo S-VECD, o módulo dinâmico, expresso como módulo de armazenamento (E'), foi convertido em módulo de relaxação por meio da série de Prony. A Tabela 23 apresenta os coeficientes do ajuste sigmoidal obtidos para o módulo de armazenamento (E'). Os ajustes da série de Prony, tanto para o módulo de armazenamento quanto para o módulo de relaxação, foram realizados pelo método de colocação, adotando-se 17 termos, com tempos de relaxação (ρ_i) variando de $2,0 \times 10^{-8}$ a $2,0 \times 10^8$ s, em intervalos de uma década. Os valores correspondentes de ρ_i e E_i estão apresentados na Tabela 24.

A análise dos coeficientes do ajuste sigmoidal e das séries de Prony indica que as misturas recicladas com cápsulas apresentam transições mais suaves entre os regimes viscoelástico e elástico, evidenciando comportamento mecânico menos rígido. Em contrapartida, a mistura com RAP apresentou os maiores valores de E_i , indicando maior rigidez. Conforme apresentado na Tabela 25, a taxa de crescimento do dano aumenta em misturas mais rígidas, sendo a mistura RAP com maior valor do parâmetro α ,

confirmando seu comportamento mais rígido. Esse resultado está em concordância com Sahebzamani *et al.* (2022), que observaram aumento do parâmetro α em misturas com maior rigidez.

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

MISTURA	Coeficientes do ajuste sigmoidal			
	Max E'	k	δ	y
REF	2,48E+07	5,56	-0,36	-0,68
RAP	3,08E+07	4,62	-1,44	-0,41
RAP C1	2,44E+07	4,64	-1,19	-0,55
RAP C2	2,49E+07	4,94	-0,96	-0,58

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	RAP C1	RAP C2
2.00E+08	6787	48187,46214	9420	10678
2.00E+07	4853	20517,74087	5022	5935
2.00E+06	11918	56653,42662	12918	14855
2.00E+05	23431	108383,1578	25355	28224
2.00E+04	48240	227015,1299	56060	59039
2.00E+03	102341	477185,5258	135175	132718
2.00E+02	228511	961879,5477	348715	321656
2.00E+01	540209	1751042,901	885454	797700
2.00E+00	1295388	2745627,875	1946182	1804437
2.00E-01	2766647	3627221,461	3311980	3258892
2.00E-02	4457694	4056958,119	4193269	4358320
2.00E-03	4987910	3932192,583	4079821	4364246
2.00E-04	4045045	3404827,959	3265462	3500324
2.00E-05	2647839	2711824,898	2297977	2425455
2.00E-06	1535636	2035161,639	1493082	1537521
2.00E-07	834287	1464045,421	923965	924446
2.00E-08	450289	1061829,998	573360	555921

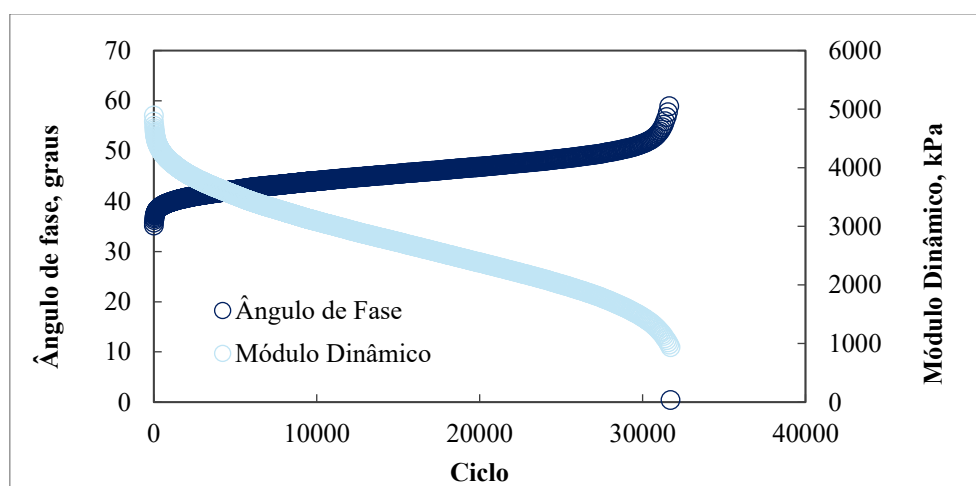
Tabela 25: Taxa de crescimento do dano das misturas asfálticas.

Mistura	α
REF	4,259
RAP	4,396
RAP C1	3,699
RAP C2	3,893

4.1.6. Fadiga à tração direta

Os resultados do ensaio de fadiga à tração direta foram analisados com base no modelo S-VECD, considerando diferentes amplitudes de deformação. Para cada nível de deformação (150, 180 e 210 μS) foi utilizada uma amostra distinta. Ressalta-se que, antes do início do ensaio de fadiga, realizou-se o ensaio de módulo dinâmico (*fingerprint*), com o objetivo de corrigir possíveis diferenças de rigidez entre as amostras. A Figura 34 apresenta as curvas de módulo dinâmico ($|E^*|$) e ângulo de fase (δ) em função do número de ciclos, obtidas na etapa inicial do ensaio. A partir dessas curvas, é possível identificar o ciclo de ruptura, caracterizado por uma queda abrupta do ângulo de fase.

Figura 34: Módulo dinâmico e ângulo de fase versus número de ciclos do ensaio de fadiga.



A aplicação do modelo S-VECD requer a quantificação de dois parâmetros fundamentais: a pseudorrigidez, ou integridade do material (C), e o dano acumulado (S). A partir desses parâmetros são construídas as curvas de integridade do material em função do dano para cada nível de deformação aplicado. Para uma mesma mistura asfáltica,

espera-se que essas curvas se sobreponham independentemente da amplitude de deformação utilizada no ensaio. Essa relação entre C e S é independente de fatores que influenciam o desempenho à fadiga dos pavimentos asfálticos, como amplitude de carregamento, modo de solicitação, frequência e temperatura. Dessa forma, o modelo S-VECD é capaz de representar o comportamento à fadiga a partir de uma matriz de ensaios laboratoriais relativamente simplificada.

Neste estudo, o comportamento do material foi descrito por um ajuste (fitting) das curvas por um modelo de potência do tipo: $C = 1 - C_{11} \times S^{C_{12}}$, onde C_{11} e C_{12} são as constantes do modelo de regressão. A Figura 35 apresenta os resultados de três amostras, com diferentes amplitudes de deformação, utilizadas para determinar a curva C vs S gerada para as misturas. As Figuras 35 a 38 apresentam as curvas C versus S para todas as misturas já ajustadas.

Figura 35: Curva característica de dano das misturas na temperatura de 25°C da mistura REF.

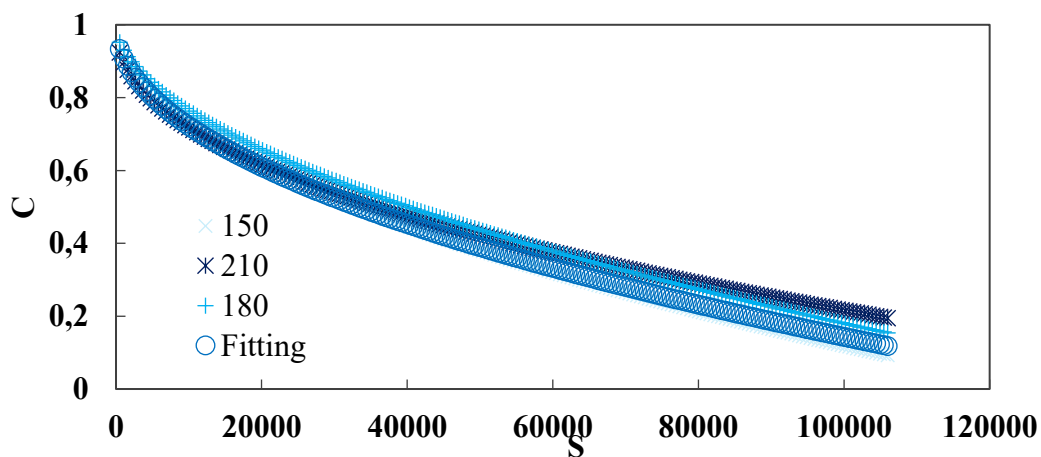


Figura 36: Curva característica de dano das misturas na temperatura de 25°C da mistura RAP.

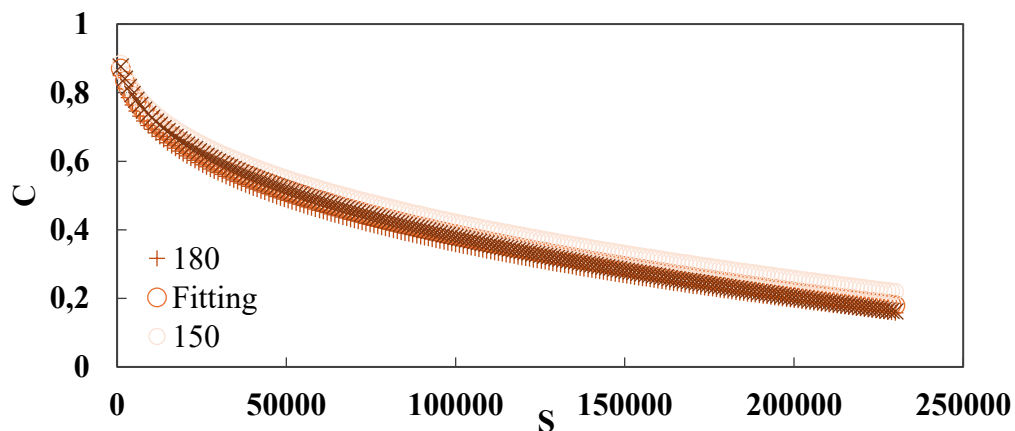


Figura 37: Curva característica de dano das misturas na temperatura de 25°C da mistura RAP C1.

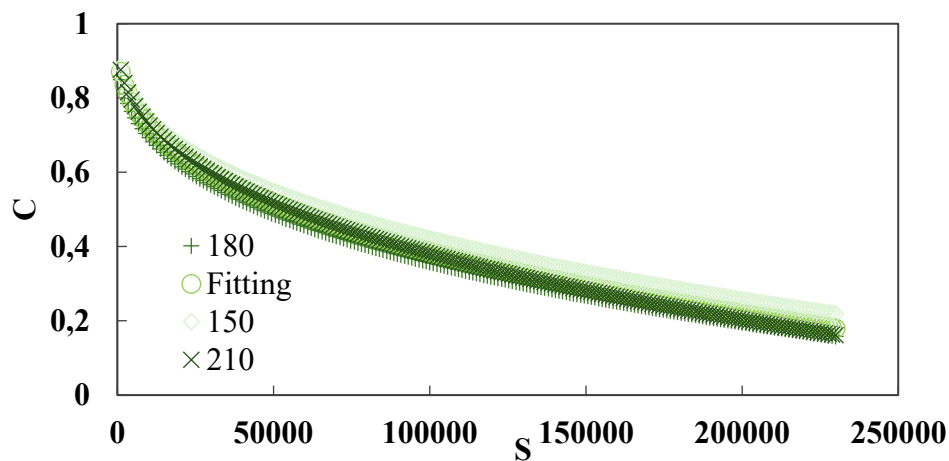
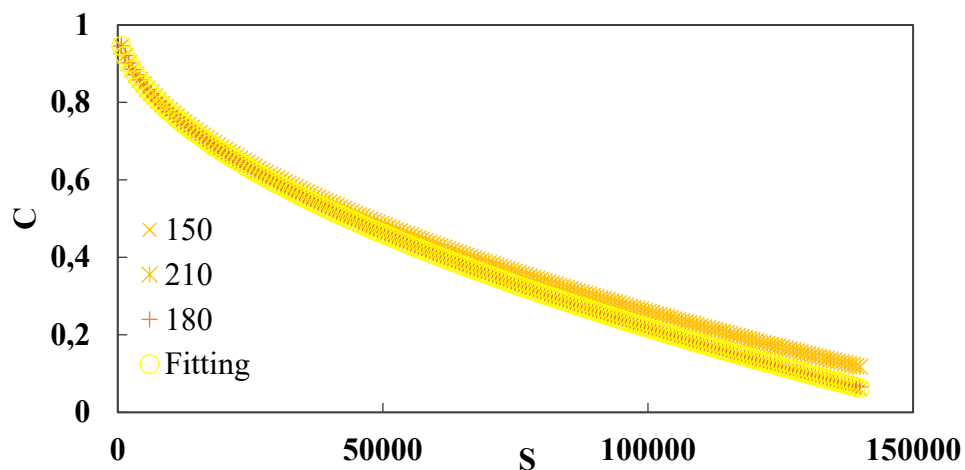
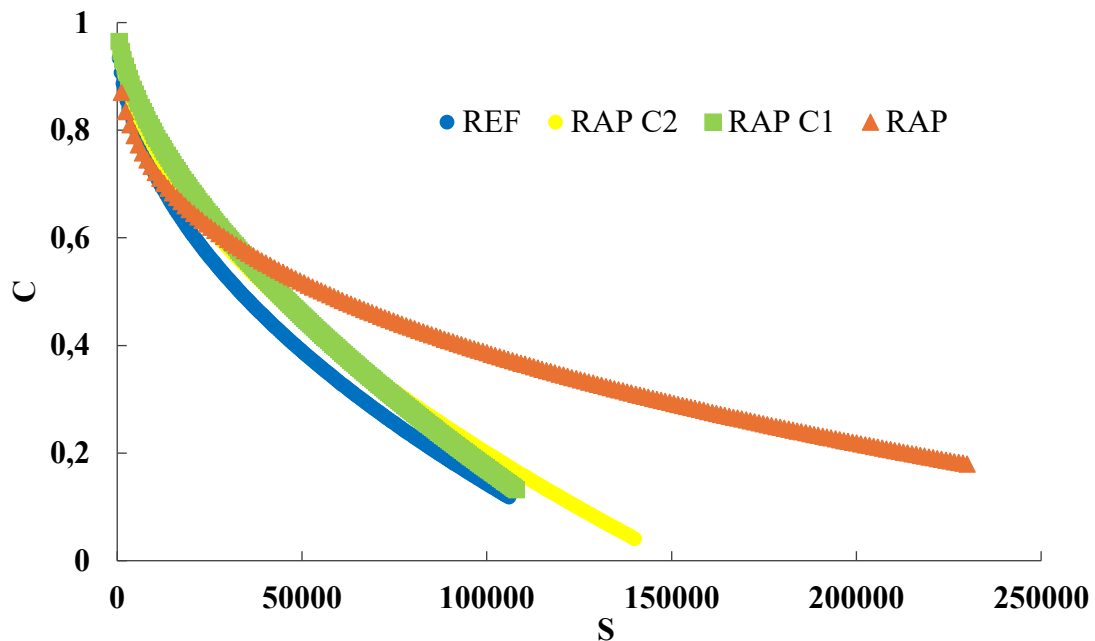


Figura 38: Curva característica de dano das misturas na temperatura de 25°C da mistura RAP C2.



Para uma avaliação mais completa do desempenho à fadiga das misturas asfálticas é necessária a utilização das envoltórias de ruptura e de simulações que considerem a estrutura do pavimento, o tráfego e o clima. A partir das curvas C versus S, avaliou-se a taxa de perda de integridade e a integridade na ruptura, sendo que maiores perdas de integridade, para um mesmo nível de dano e maiores valores de integridade na ruptura, estão associados a pior desempenho à fadiga.

Figura 39: Curvas características de dano ajustadas de todas as misturas estudadas para a temperatura de 25°C.



Ao analisar a Figura 39, observa-se que a mistura de referência (REF) apresenta a maior taxa de perda de integridade ao longo do ensaio, indicando menor resistência ao acúmulo de dano. Em contraste, a mistura RAP apresenta a menor taxa de perda de integridade, evidenciando maior resistência ao dano acumulado. As misturas RAP C1 e RAP C2 exibem comportamento semelhante, com redução progressiva da integridade à medida que o dano aumenta. Entretanto, a mistura RAP C1 mantém valores ligeiramente superiores de integridade para um mesmo nível de dano, indicando uma evolução do dano mais lenta em comparação à RAP C2. De modo geral, os resultados indicam que a incorporação de cápsulas rejuvenescedoras em misturas contendo RAP modifica a evolução do dano, influenciando a taxa de degradação do material. Comportamento semelhante foi observado por Macedo (2025) e Correa (2020), que relataram menor taxa de perda de integridade em misturas com RAP quando comparadas às misturas convencionais, atribuída principalmente à maior rigidez associada ao ligante envelhecido.

Souza (2023) destaca que as misturas contendo RAP apresentaram valores de C mais elevados para um dado valor de S, devido ao uso de material envelhecido, o que confere maior rigidez ao material e, conseqüentemente, resulta em uma evolução mais rápida do dano, ou em falha, com menor perda de integridade estrutural. Por outro lado, as misturas

recicladas com AR apresentaram curvas C versus S indicando evolução mais lenta do dano, semelhantes às observadas nas misturas de referência.

Para complementar a análise do comportamento à fadiga das misturas asfálticas estudadas, foram utilizadas as envoltórias de ruptura considerando o critério de falha baseado na taxa média de variação da energia de pseudo-deformação liberada por ciclo durante o ensaio (G^R). A partir desse critério, foram obtidas as envoltórias de ruptura G^R versus N_f , ajustadas por um modelo de potência, expresso de forma linear em escala logarítmica, no qual o parâmetro G^R apresenta forte correlação com o número de ciclos até a falha (N_f). Esse comportamento ocorre porque, quanto mais rapidamente o dano se acumula, mais cedo ocorre a ruptura do material. Outro critério de falha adotado foi o da redução da pseudorrigidez (D_R), no qual, para um determinado material, estabelece-se uma relação única entre o somatório de $(1 - C)$ e o número de ciclos até a ruptura, independentemente das condições de ensaio. O parâmetro correspondente à redução média da pseudorrigidez ao longo do ensaio, até o instante da ruptura (D_R).

Outro parâmetro utilizado para avaliar a capacidade do material em resistir ao dano, com base no critério de ruptura D_R , é o parâmetro S_{app} , que considera conjuntamente a influência da rigidez e da tenacidade do material. Esse parâmetro é fundamentado na teoria VECD, sendo recomendado que o valor de S_{app} seja superior a 8 para que o material apresente desempenho adequado, conforme indicado por Wang (2019).

A Tabela 26 apresenta os coeficientes de *fitting* da curva C vs S , os coeficientes de regressão das envoltórias de ruptura para cada mistura asfáltica e os valores obtidos do critério de falha D_R e do parâmetro S_{app} . Os valores de R^2 e os desvios padrão associados aos critérios indicam a baixa variabilidade dos resultados. As Figura 40 e Figura 41 apresentam as envoltórias de ruptura e simulação de fadiga a partir do critério de ruptura G^R .

Tabela 26: Parâmetros de ajuste da função potência C_{11} e C_{12} , coeficientes de regressão do critério G_R , critério D_R e valor de S_{app}

Mistura	Fitting curvas		Critério de ruptura G_R			Critério de ruptura D_R		S_{APP}
	C x S		y	Δ	R^2	D_R	Desvio padrão	
	C_{11}	C_{12}						
REF	3,07E-03	0,489	5E+08	-1,786	1,00	0,48	0,012	35,50
RAP	1,11E-02	0,348	3E+09	-1,929	0,99	0,41	0,025	21,80
RAP C1	7,77E-04	0,606	3E+08	-1,779	1,00	0,38	0,003	20,50
RAP C2	1,61E-03	0,539	2E+08	-1,663	0,97	0,44	0,026	24,00

Figura 40: Envoltórias de ruptura baseadas no G^R das misturas estudadas.

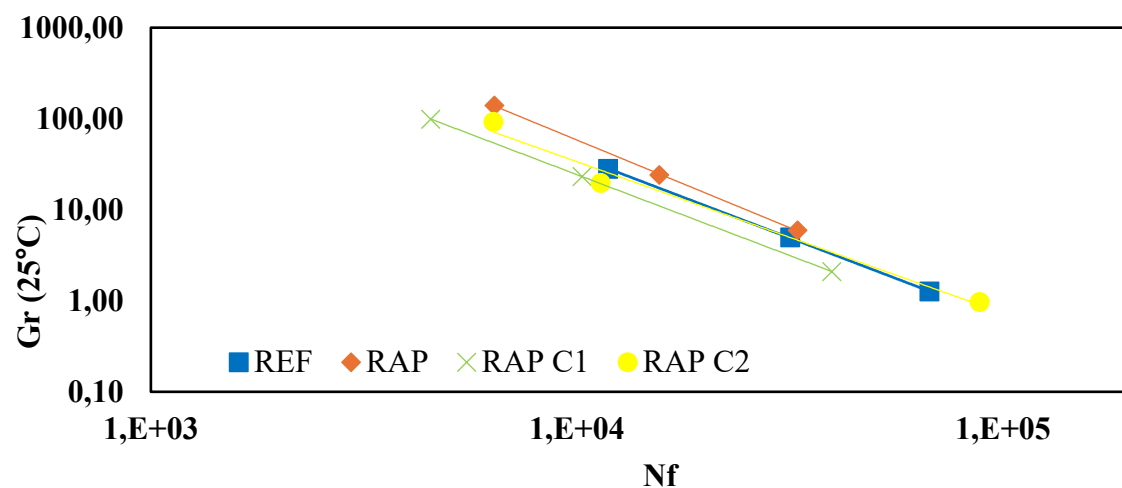
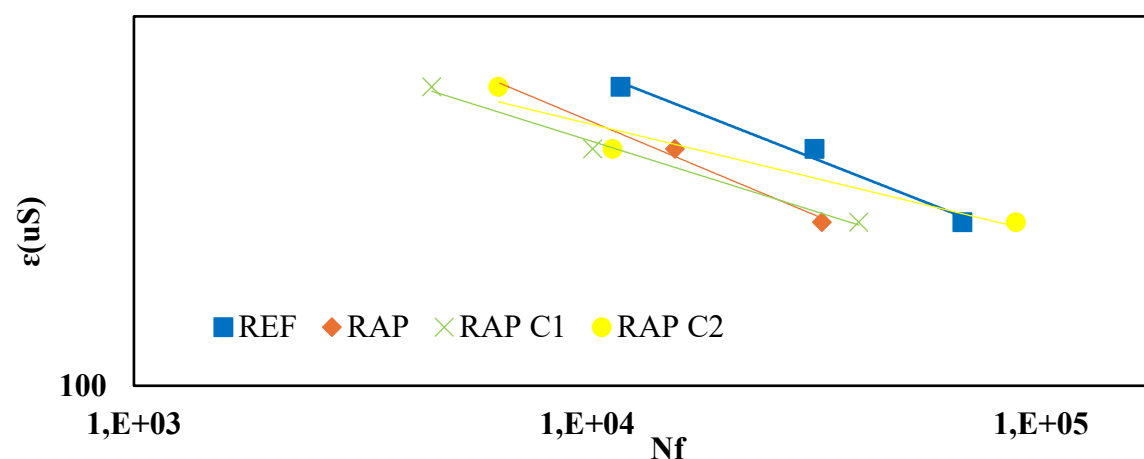


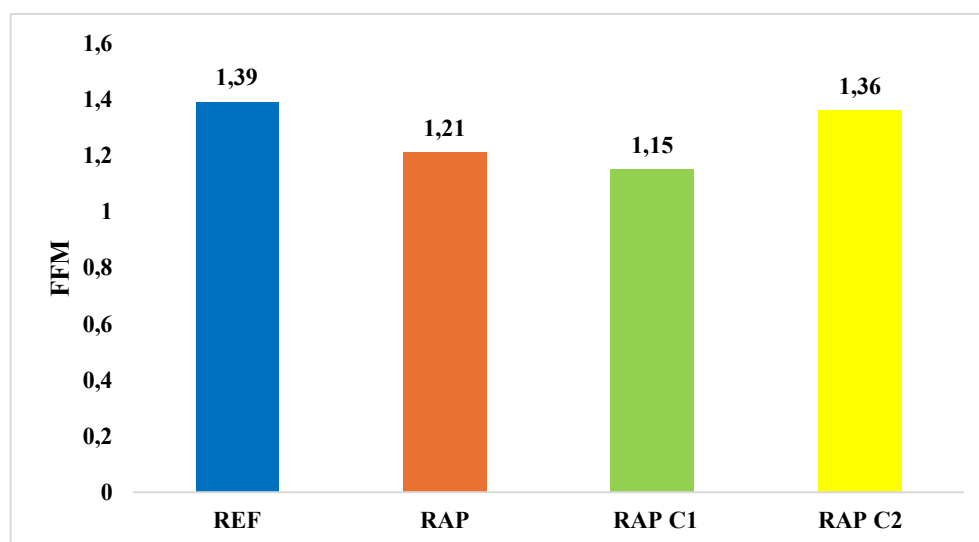
Figura 41: Simulação da vida de fadiga a partir do critério de ruptura G^R



Valores mais elevados de D_R estão associados a uma maior capacidade das misturas de acumular dano até a ruptura. Nesse sentido, a mistura de referência apresentou o maior valor de D_R , enquanto a RAP C1 apresentou o menor. Quanto ao parâmetro S_{app} , a mistura RAP C2 apresentou o melhor desempenho, situando-se na faixa adequada para tráfego extremamente pesado, enquanto a mistura RAP apresentou o menor valor, indicando menor resistência à fadiga. Ao considerar esses parâmetros para aplicação em campo, a RAP C1 apresenta maior risco de falha prematura devido ao menor D_R (0,38). Em contrapartida, a RAP C2 mostra-se mais indicada para pavimentos submetidos a cargas pesadas, pois combina boa resistência à fadiga com maior D_R (0,44), aliado a um S_{app} de 24,0. As misturas REF e RAP apresentam desempenho intermediário; entretanto, o RAP, apesar de sua maior rigidez, possui menor D_R (0,41), o que pode comprometer sua durabilidade em campo.

Adicionalmente, as misturas foram avaliadas por meio do Fator de Fadiga das Misturas (FFM), para o qual valores mais elevados indicam maior tolerância ao dano (Nascimento, 2016). Conforme apresentado na Figura 42, a mistura RAP C2 apresentou desempenho semelhante em relação a mistura de referência, o que sugere que a utilização do agente rejuvenescedor (AR) pode conferir às misturas recicladas um comportamento à fadiga semelhante ao de misturas convencionais.

Figura 42: Fator de Fadiga das Misturas (FFM) a 25°C.



O FFM, obtido a partir de curvas de Wöhler simuladas e proposto por Schuster (2018), apresenta boa correlação com a classificação da resistência à fadiga baseada no dano simulado sob condições de carregamento mais próximas das reais. Nesse contexto, Queiroz determinou um valor de FFM igual a 1,35 para uma mistura asfáltica produzida com ligante CAP 50/70, resultado semelhante ao obtido nesta pesquisa para a mistura convencional.

Os ensaios laboratoriais, quando analisados de forma isolada, apresentam limitações para uma avaliação representativa da resistência à fadiga de misturas asfálticas. Dessa forma, torna-se necessária uma avaliação integrada, que considere simultaneamente as curvas C versus S, as envoltórias de ruptura e as características de rigidez do material, aplicadas a uma estrutura de pavimento, por meio dos softwares FlexPAVE ou LVECD. Essas ferramentas permitem incorporar o comportamento viscoelástico e o dano acumulado ao nível estrutural do pavimento. Entretanto, tais análises não foram contempladas no escopo do presente trabalho.

4.1.7. Mensuração do *healing*

A aplicação de períodos de repouso no ensaio de fadiga à tração direta, realizado a 25 °C com intervalos de repouso de 270 s, resulta em descontinuidades na curva característica de dano ($C \times S$), evidenciando o efeito de autorregeneração do material. As Figuras 40 a 43 apresentam os resultados obtidos nesse ensaio para cada tipo de mistura. Observa-se que, imediatamente após cada período de repouso, ocorre um aumento momentâneo da integridade, indicando uma recuperação parcial da estrutura da mistura. No entanto, esse aumento não implica alteração no índice de regeneração, uma vez que esse parâmetro é determinado com base nas variações no espaço de dano. Oliveira (2019) avaliou o healing no ensaio de fadiga com seis fases de carregamento ($Nf^{10\%}$), com 4 h de repouso, e constatou que não ocorre recuperação total do módulo complexo nem da integridade do material, conforme as curvas $C \times S$. A autora observa que algumas misturas apresentaram Nf inferior ao da referência, mesmo com materiais e parâmetros volumétricos idênticos, atribuindo essas diferenças a variabilidades experimentais, como moldagem, serragem dos corpos de prova e variações na amplitude de deformação aplicada. Além disso, ensaios com repouso apresentaram amplitudes médias menores, o

que pode induzir interpretações equivocadas de healing quando se considera apenas a recuperação do módulo, especialmente diante da influência da temperatura no comportamento reológico dos materiais viscoelásticos. A Tabela 27 apresenta os valores obtidos para cada uma das misturas asfálticas estudadas.

Figura 43: Curva característica de dano com inclusão de períodos de repouso de 270 a 25° C da mistura REF.

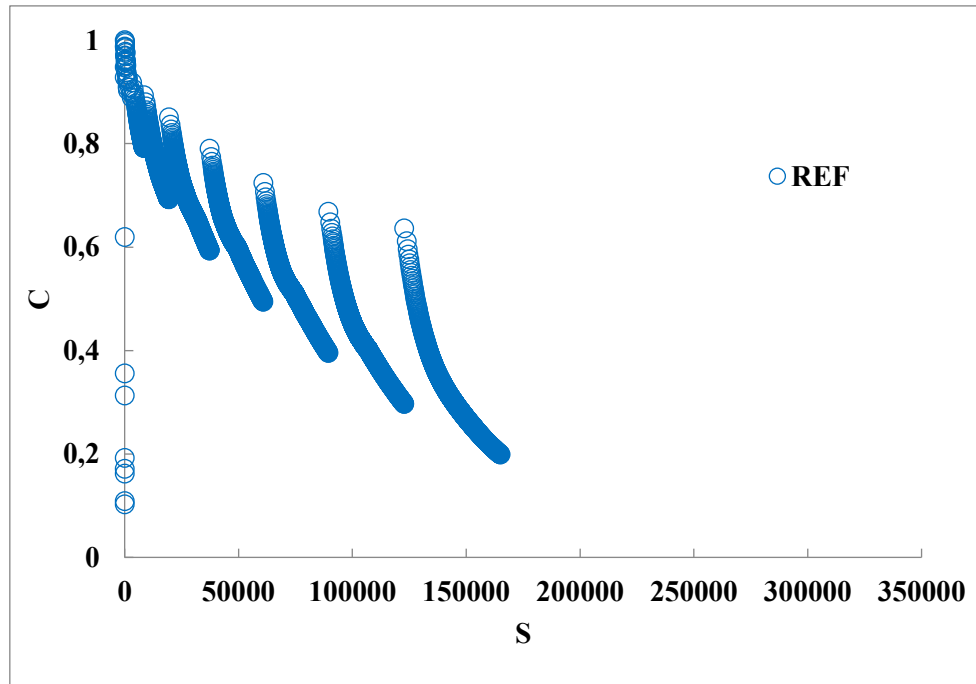


Figura 44: Curva característica de dano com inclusão de períodos de repouso de 270 a 25° C da mistura RAP.

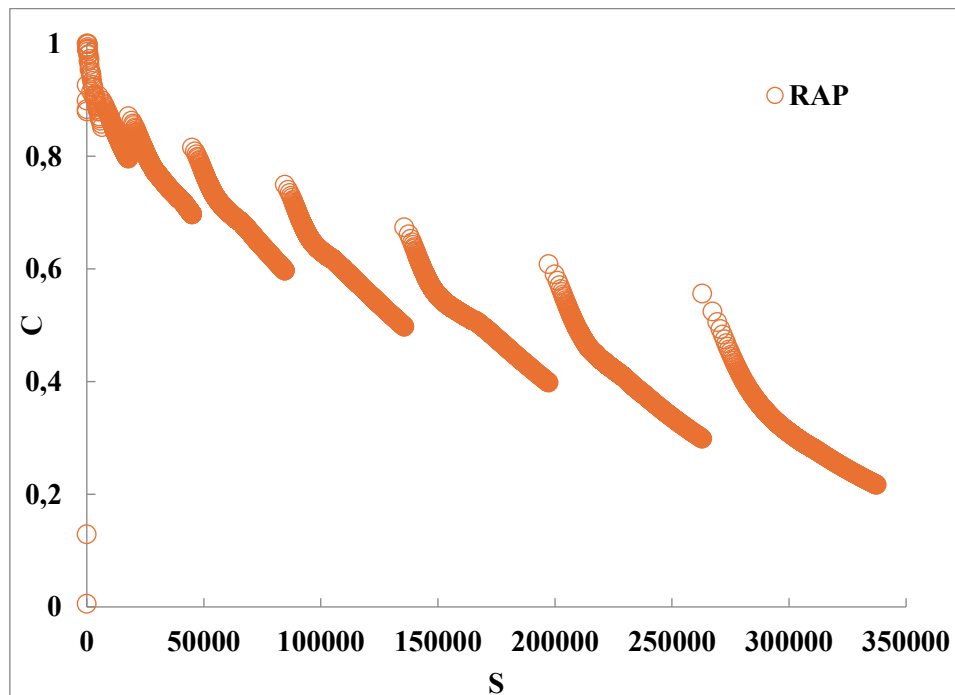


Figura 45: Curva característica de dano com inclusão de períodos de repouso de 270 a 25° C da mistura RAP C1.

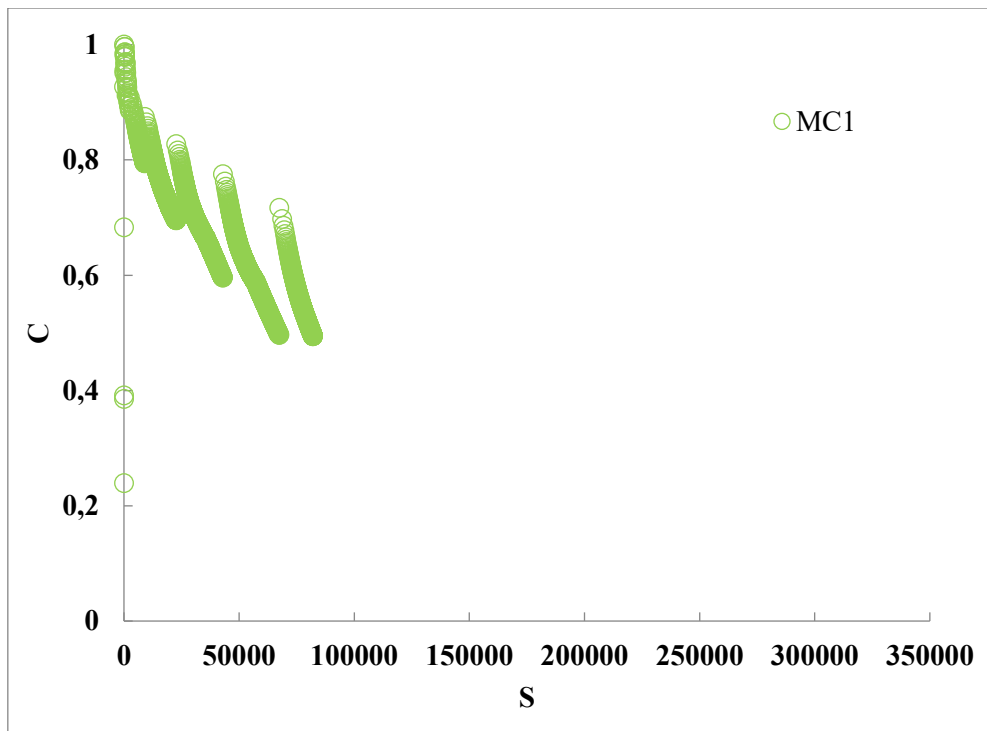


Figura 46: Curva característica de dano com inclusão de períodos de repouso de 270 a 25° C da mistura RAP C2.

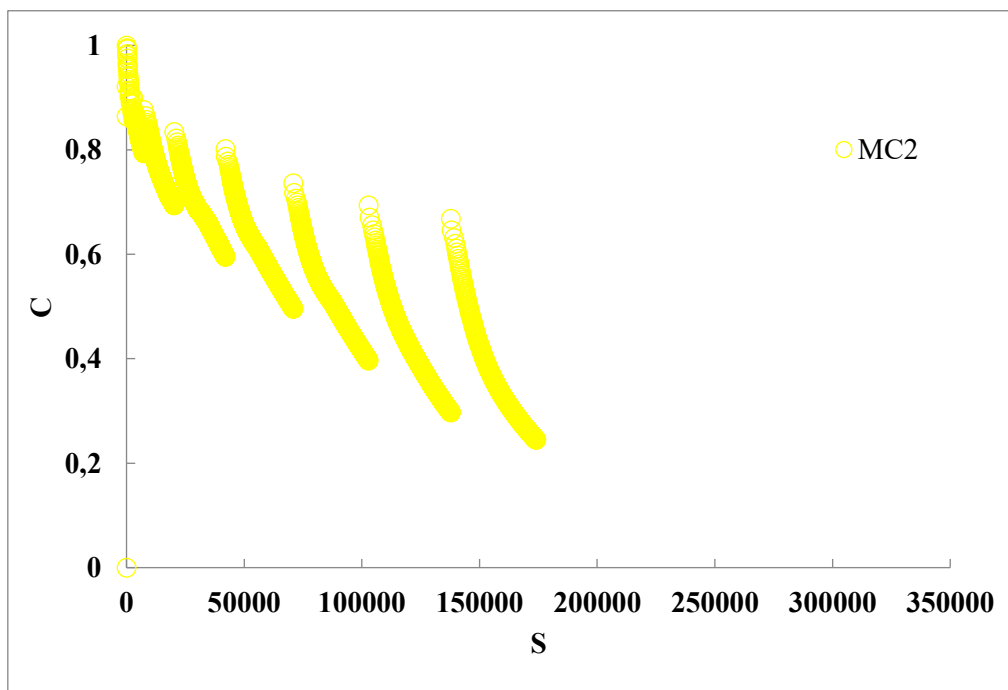


Tabela 27: Resultados de índice de regeneração das misturas asfálticas.

Mistura	Nível de integridade	Dano na integridade de repouso		Variação de dano entre pontos de mesma integridade	Índice de regeneração
	C	S0	Sf	Δs	%Hs
REF	0,9	1437	2757	1320	92
	0,8	7761	11869	4107	53
	0,7	18269	26335	8066	44
	0,6	36136	48509	12373	34
	0,5	59598	75153	15554	26
	0,4	88109	106350	18240	20
	0,3	121409	143914	22506	18,5
Média					41%
RAP	0,9	3622	6371	2748	76
	0,8	16560	25225	8665	52
	0,7	43625	59528	15903	37
	0,6	82827	108306	25479	31
	0,5	133645	166909	33264	25
	0,4	195366	230260	34894	18
	0,3	260720	301540	40820	16
Média					36%
RAP C1	0,9	2094	3248	1154	55
	0,8	8909	13411	4502	51
	0,7	22601	31368	8768	39
	0,6	42859	56063	13203	31
	0,5	67325	81971	14646	22
Média					39%
RAP C2	0,9	1822	2903	1081	59
	0,8	6904	11141	4238	61
	0,7	19870	28928	9058	46
	0,6	41696	57567	15871	38
	0,5	70569	88888	18319	26
	0,4	102560	123387	20828	20
	0,3	137462	164497	27036	20
Média					39%

A análise dos resultados de regeneração das misturas asfálticas revelou que a mistura de referência apresentou o maior índice médio de regeneração (%Hs), enquanto as misturas contendo cápsulas de rejuvenescedor exibiram valores semelhantes de %Hs.

Observou-se que, independentemente da composição da mistura, a regeneração foi mais expressiva nos estágios iniciais de dano, reduzindo-se progressivamente à medida que o dano se acumulava, comportamento condizente com o esperado.

A mistura RAP apresentou capacidade de regeneração inferior à da mistura de referência, conforme esperado, devido ao efeito negativo do envelhecimento e da maior oxidação do ligante, que limitam a recuperação da integridade da mistura. Em contrapartida, as misturas RAP C1 e RAP C2 exibiram índices de regeneração superiores ao da mistura RAP e próximos aos da referência, embora ainda ligeiramente inferiores a esta. Esses resultados indicam que os períodos de repouso influenciam a regeneração dos materiais asfálticos e que a incorporação de agentes rejuvenescedores encapsulados modifica o comportamento de resistência ao dano das misturas recicladas, corroborando a viabilidade de utilizar material fresado em novas misturas.

A Figura 47 apresenta o comportamento do índice de regeneração em função da integridade para a temperatura e PR avaliados. Observa-se que a aproximação exponencial proposta descreve de maneira satisfatória a tendência dos pontos experimentais.

Os valores de N_f para a condição sem períodos de repouso foram determinados a partir da relação entre a evolução do dano no espaço $C \times S$ e o número de ciclos de carregamento (Figura 48). Conforme proposto por Underwood *et al.* (2012), o dano acumulado (S) foi convertido em um número equivalente de ciclos (N) por meio da lei de evolução do dano do modelo S-VECD, permitindo a determinação da vida à fadiga correspondente ao critério de falha adotado. Observa-se que o ensaio sem período de repouso permite avaliar a resistência à fadiga das misturas sob condições severas de tráfego contínuo em campo. Nessas condições, as misturas RAP C1 e RAP C2 apresentam aumento de N_f de 20% e 167%, respectivamente, em relação à mistura reciclada. Além disso, ao comparar essas misturas com e sem período de repouso, o N_f aumenta 55% para a RAP C1 e 29% para a RAP C2, evidenciando o efeito de regeneração.

Guedes (2024) observou um aumento significativo na vida à fadiga das misturas asfálticas quando submetidas a períodos de repouso. Foram avaliadas misturas com ligante convencional (CAP 50/70), ligante AMP 55/75 e ligante modificado por

polímeros, que apresentaram incrementos de 51%, 44% e 47%, respectivamente. De forma geral, observou-se aproximadamente uma duplicação do tempo de vida à fadiga das misturas analisadas.

Figura 47: Potencial de healing em função da integridade.

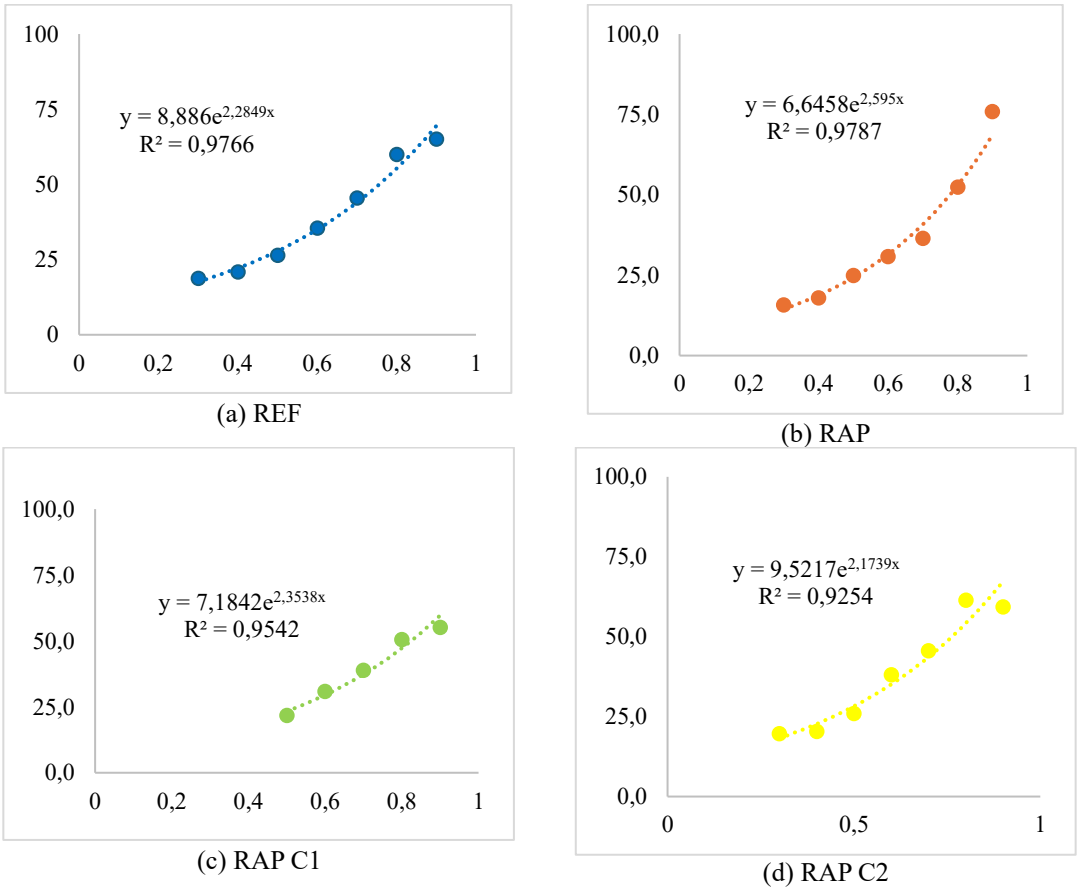
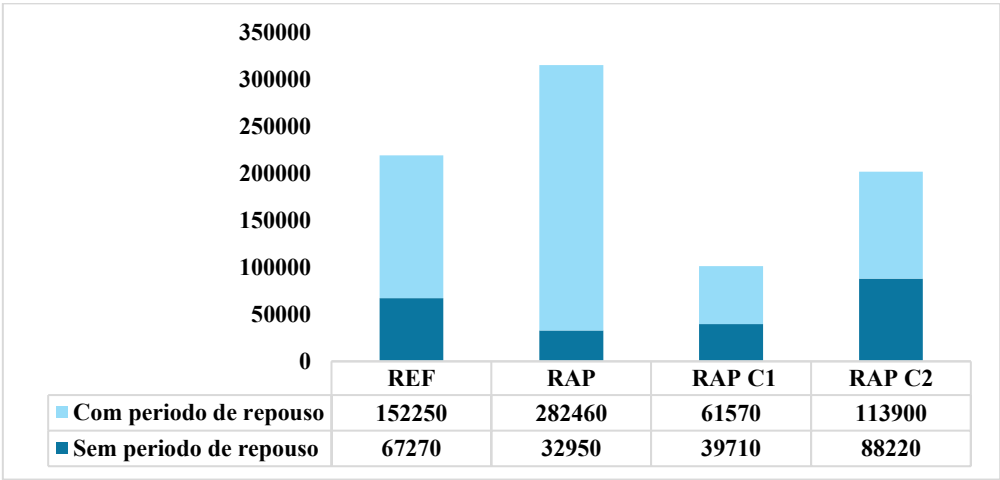


Figura 48: Resultados dos ensaios cíclicos - prolongamento na vida de fadiga com e sem períodos de repouso das misturas asfálticas.



Ao analisar o acréscimo na vida de fadiga decorrente da introdução de períodos de repouso, observou-se, de maneira geral, um aumento expressivo no tempo de vida das misturas asfálticas estudadas. A avaliação desse fenômeno, entretanto, é desafiadora devido à complexidade do processo, que envolve interações entre calor, pressão e compostos químicos, influenciadas por fatores como composição do ligante, temperatura e carga de tráfego. Além disso, processos de envelhecimento, degradação e regeneração do material contribuem para a dificuldade de modelagem e previsão precisa do desempenho das misturas ao longo do tempo.

4.1.8. Análise comparativa do desempenho das misturas recicladas

Para avaliar o impacto da incorporação das cápsulas na mistura reciclada foi realizada uma análise comparativa dos parâmetros de fadiga e de *healing*. Os resultados estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28: Análise comparativa das misturas recicladas.

Mistura	DR	Sapp	FFM	Nf	Nfrepouso	Crepouso	%Hs
RAP	0,41	21,80	1,21	32950	282460	0,20	36
RAP C1	0,38	20,50	1,15	39710	61570	0,50	39
RAP C2	0,44	24,00	1,36	88220	113900	0,20	39

DR: critério de ruptura; S_{app}: indicador da capacidade de dano; FFM: fator de fadiga das misturas; Nf: número de ciclos até a falha; Nfrepouso: número de ciclos até a falha no ensaio de fadiga com período de repouso; Crepouso: pseudorrigidez ou integridade do material no momento até a falha; %Hs: Índice de regeneração.

A mistura RAP C2 apresentou o melhor desempenho em fadiga e regeneração, combinando maior DR (0,44), S_{app} compatível com tráfego pesado (40,59), FFM elevado (1,36) e Nf superiores tanto sem quanto com períodos de repouso, evidenciando resistência ao dano e eficiência no healing devido às cápsulas rejuvenescedoras.

A RAP C1 apresentou DR (0,38), S_{app} (35,27) e Nf intermediários, indicando menor capacidade de suportar dano e maior risco de falha prematura, embora o índice de regeneração (%Hs = 39) seja superior ao do RAP puro, a mistura falhou com um índice de integridade 0,40. A mistura RAP apresentou menor DR (0,41), S_{app} (33,60), FFM (1,21) e capacidade de regeneração (%Hs = 36), confirmando que o envelhecimento do ligante limita a fadiga e a autorregeneração da mistura.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados desta pesquisa, bem como sugestões para o desenvolvimento de estudos futuros relacionados ao mesmo objeto de investigação.

5.1. Conclusões

- Os resultados de resistência à tração, módulo de resiliência e deformação permanente indicaram redução da rigidez das misturas recicladas com cápsulas em relação à mistura reciclada de referência. No ensaio de RT, a mistura com cápsulas MC2 apresentou menor resistência quando comparada à mistura RAP, enquanto, no ensaio de MR, as misturas com cápsulas registraram os menores valores. Esse comportamento pode-se justificar sob a liberações de óleo das cápsulas que ocorrem durante a usinagem e compactação dos corpos de prova. Em relação ao dano por umidade induzida, todas as misturas recicladas apresentaram comportamento estatisticamente semelhante.
- No ensaio de módulo dinâmico, a mistura RAP apresentou os maiores valores, evidenciando que o ligante envelhecido aumenta a rigidez da mistura. As misturas RAP C1 e RAP C2 exibiram rigidez intermediária e valores próximos entre si, indicando que o aumento do teor de óleo não alterou significativamente o módulo. Observa-se que, em baixas frequências, as curvas de RAP C1 e RAP C2 se aproximam da mistura de referência (REF), enquanto em altas frequências se aproximam da RAP, sugerindo que o efeito das cápsulas depende do regime de carregamento. Além disso, as misturas recicladas com cápsulas apresentaram transições mais suaves entre os regimes viscoelástico e elástico, evidenciando comportamento mecânico menos rígido.
- A resistência à fadiga das misturas asfálticas foi avaliada por meio do ensaio de fadiga à tração direta, utilizando o modelo S-VECD. Pelo critério de falha G^R , a mistura com melhor desempenho foi a RAP C2, apresentada pela menor inclinação na envoltória

de ruptura. De acordo com o critério de falha D_R , considerando a capacidade de dano S_{app} , a mistura RAP C2 também se destacou como a de melhor desempenho à fadiga.

- Ao analisar o impacto do processo de regeneração, ambas as misturas com cápsulas apresentaram o mesmo índice de regeneração, superior ao da mistura reciclada, indicando efeito positivo da incorporação de cápsulas com agentes rejuvenescedores. Quanto ao ganho na vida à fadiga, observou-se aumento significativo do tempo médio de vida para todas as misturas analisadas.

Dessa forma, a avaliação da autorregeneração por meio do ensaio de fadiga à tração direta evidenciou a eficiência do sistema com agentes rejuvenescedores encapsulados. A adição das cápsulas permitiu não apenas recuperar a resistência original das misturas, como também aumentá-la, indicando que esse sistema de autorregeneração é promissor para o desenvolvimento de métodos autônomos de manutenção de pavimentos asfálticos. Dentre as misturas analisadas, indica-se a mistura RAP C2 por apresentar melhor desempenho dos parâmetros de fadiga nos ensaios de tração direta com repouso. Apesar dos resultados promissores, o estudo apresenta algumas limitações. A avaliação do healing foi realizada com base em um único protocolo de repouso e a uma única temperatura, o que limita a análise da sensibilidade do fenômeno frente a variações climáticas, ambientais e de tráfego, uma vez que a relação entre tempo e temperatura em laboratório difere do comportamento observado em campo. Adicionalmente, o RAP utilizado apresenta grau de envelhecimento mais elevado, o que pode influenciar o processo de dosagem da mistura. Para uma avaliação mais robusta, estudos futuros podem empregar múltiplos tempos de repouso, possibilitando a construção de curvas mestras de *healing* e uma análise mais detalhada da influência do tempo de recuperação. Além disso, a realização de análises de ciclo de vida permitiria verificar a viabilidade econômica e ambiental da incorporação do líquido da castanha de caju (LCC) em misturas asfálticas recicladas.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Com a finalidade de aprofundar os resultados obtidos nesta pesquisa, propõe-se para trabalhos futuros:

- Avaliar o desempenho de misturas asfálticas produzidas com diferentes teores de RAP submetido a tratamento prévio, adotando uma faixa granulométrica fixa;
- Simular o comportamento do pavimento em condições climáticas e de tráfego realistas, utilizando softwares como LVECD ou FlexPAVE, para analisar o dano por fadiga das misturas asfálticas;
- Realizar tomografia computadorizada para analisar a distribuição das cápsulas, assim como análises microscópicas após a aplicação do protocolo *healing*;
- Investigar outros teores de adição de cápsulas nas misturas;
- Ampliar a compreensão da *self-healing* por meio da aplicação de diferentes rotinas de ensaio de fadiga, como o ensaio de flexão em viga de quatro pontos.

CAPÍTULO 6

6. REFERÊNCIAS

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) T 342, Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures, 2019. West Conshohocken.

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) TP 107-18, Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests, 2021. West Conshohocken.

ABBINA, S., ANILKUMAR, P. Emergence of Sustainable Approaches for Functional Materials: Cashew Nut Shell Liquid and Other Relevant Crop-Based Renewable Resources, in: P. Anilkumar (Ed.), Cashew Nut Shell Liquid, Springer International Publishing, 2017, pp. 1–17, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47455-7>

ABDALHAMEED, Abdalsattar M.; ABD, Duraide M. Rutting Performance of Asphalt Layers Mixtures with Inclusion RAP Materials. Anbar Journal for Engineering Sciences, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 203–210, 2021. Disponível em: https://ajes.uoanbar.edu.iq/article_171188.html. Acesso em: 30 set. 2023.

AKBARI, A.; MODARRES, A. Evaluating the effect of nano-clay and nano-alumina on the fatigue response of bitumen using strain and time sweep tests. International Journal of Fatigue. v. 114, p. 311-322. 2018.

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

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

ALMURATI, H.; BAAJ, H. Evaluating self-healing behavior of asphalt binders modified with phase-chande materials, polymers and recycled glass powder. *Polymers*. v. 19, n. 8. 2023.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS 3 AASHTO. M320: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS 3 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 3 ASTM. C127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 3 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 3 ASTM. C136/C136M: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 3 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 3 ASTM. D5821: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 3 ASTM. D2041/D2041M: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 3 ASTM. D2172: Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures. 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 3 ASTM. D2419: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 3 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 3 ASTM. D36/D36M: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 3 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 3 ASTM. D5/D5M: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 3 ASTM. D6373: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 3 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 3 ASTM. D7867: Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Asphalt Binder Using the Linear Amplitude Sweep. 2013.

ANUPAM, B. R.; SAHOO, U. C.; CHANDRAPPA, A. K. A metodological review on self-healing asphalt pavements. *Construction and Building Materials*. v. 321, e-126395. 2022.

ARAO, M. (2014) *Análise da Vida de Fadiga de Pavimentos Flexíveis em Diferentes Misturas*. 2014. 61 p. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil.

asfálticos, *Transp. Res. Rec.* 2673 (2019) 368–378, <https://doi.org/10.1177/0361198119843096>

ARRUDA, Sonaly Mendes. *Avaliação do comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas*. 2021. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

ARRUDA, S.M., da Silva, C.C.V.P., de Macêdo, A.L.F. *et al.* Effects of self-healing mechanism on the fatigue life of recycled asphalt mixes. *Mater Struct* **57**, 129 (2024). <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02412-z>

ASHOURI, M. (2014) *Modeling Microdamage Healing in Asphalt Pavements Using Continuum Damage Theory*. Tese de Doutorado, North Carolina State University.

AURILIO, M.; TAVASSOTI, P.; ELWARDANY, M.; BAAJ, H. Impact of Styrene Butadiene-Styrene (SBS) content on asphalt Binder's fatigue resistance at various aging levels using Viscoelastic Continuum Damage and fracture mechanisms. *Construction and Building Materials*. v. 305, e-124627. 2021.

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. 85396, 2015.

BARBOSA *et al.*, Unequivocal structural assignments of three cardanol derivatives: An experimental and theoretical approach, *J. Clean. Prod.* 1175 (2019) 357–366, <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.07.112>.

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

BERNUCCI, L. B. *et al.* Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2ª edição, 2022.

BADROODI *et al.* Experimental investigation of the fatigue phenomenon in nano silica-modified warm mix asphalt containing recycled asphalt considering self-healing behavior, *Construction and Building Materials*, Volume 246, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117558>.

CAO *et al.* Preparation and performance evaluation of bio-based polyurethane modified asphalt binders: Towards greener and more sustainable asphalt modifier, *Construction and Building Materials*, Volume 476, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141209>.

CAO, W.; NOROUZI, A.; KIM, Y. R. Application of viscoelastic continuum damage approach to predict fatigue performance of Binzhou perpetual pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. v. 3, n. 2, p. 104-115. 2016.

CAPUTO *et al.*, The efficiency of bitumen rejuvenator investigated through Powder X-ray Diffraction (PXRD) analysis and T2-NMR spectroscopy. *Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, [S.L.], v. 571, p. 50-54, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.03.059>.

CARVALHO *et al.*, Impact of adding warm asphalt mix additives on recycling milled coatings: performance evaluation. *Environmental Science and Pollution Research JCR*, v. 31, p. 66318-66349, 2024.

CHEN, *et al.*, Research on the practical application of self-healing calcium alginate capsules in asphalt pavements in Fujian province, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 24, 2026, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05730>.

CHEN, Tian *et al.* Mechanical and microstructural characteristics of different interfaces in cold recycled mixture containing cement and asphalt emulsion. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 258, p. 120674, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620307216>.

COLPO, G. B. Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Vida de Quatro Pontos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil,) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2014.

COLPO, G. B. Comportamento à fadiga de misturas asfálticas: ensaios laboratoriais e instrumentação in situ. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre- RS. 2019.

COSTA *et al.*, Influence of aging, RAP content, and recycling agent on the performance of asphalt mixtures. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 31, p. 1419-1441, 2024

COSTA, L. F *et al.* Economic and Environmental Benefits of Recycled Asphalt Mixtures: Impact of Reclaimed Asphalt Pavement and Additives Throughout the Life Cycle. *Environmental Science and Pollution Research JCR*, v. 32, p. 1, 2025.

DARMAWAN, Arif; AZIZ, Muhammad. *Innovative Energy Conversion from Biomass Waste*. [S. l.]: Elsevier, 2021

DE MEDEIROS MELO NETO, Osires *et al.* Effects of the addition of fatty acid from soybean oil sludge in recycled asphalt mixtures. *Environmental Science and Pollution Research*, [s. l.], 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25808-w>.

DE MEDEIROS MELO NETO, Osires *et al.* Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 349, p.

128728, 2022. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822023856>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Norma DNIT 031/2024 3 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 183/2018 3 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 3 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 3 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.

ELNAML, I., MOHAMMAD, L. N., BAUMGARDNER, G. L., LIU, J., COOPER, S., III, & COOPER, S., Jr. (2024). Influence of Petroleum-Based and Bio-Derived Recycling Agents on High-RAP Asphalt Mixtures Performance. *Buildings*, 14(3), 567. <https://doi.org/10.3390/buildings14030567>

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

GASPAR, M. S.; VASCONCELOS, K. L.; MANUELA M. L.; BERNUCCI, L. L. B. (2020). Evaluation of binder blending on warm mix asphalt recycling. *Revista Transportes*, v. 28, n° 2, p. 87 – 99. DOI:10.14295/transportes.v28i2.2133

Gonçalves *et al.*, Cashew nut shell liquid, a valuable raw material for generating semiconductive polyaniline nanofibers, *Pol. ímeros* 28 (1) (2018) 61–68, <https://doi.org/10.1590/0104-1428.01417>.

GROSSEGER, D.; GOMEZ-MEIJIDE, B.; VAN STEENKISTE, S.; GARCÍA, Á. Influence of rheological and physical properties of heat-induced self-healing of asphalt mastic beams, *Construction and Building Materials*, v.182, p. 298–308, 2018.

GUEDES, Leonardo Rodrigues. Estudo do "fator Healing" em misturas asfálticas modificadas por polímeros utilizando o modelo S-VECD. 2024 190 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2024.

H. Wang, Y. Jing, J. Zhang, Y. Cao, L. Lyu, Preparação e avaliação de desempenho de ligante de asfaltoborracha modificado com bio-óleo de esterco suíno, *Constr.* 294 (2021) 123584, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123584>.

HASSANPOUR-KASANAGH, S.; AHMEDZADE, P.; FAINLEIB, A. M.; BEHNOOD, A. Rheological properties of asphalt binders modified with recycled materials: A comparison with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS). *Construction and Building Materials*. v. 230, 117047. 2020. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117047

HOU, T. Fatigue Performance Prediction of North Carolina Mixtures Using Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model. Thesis (Master of Science). Faculty of North Carolina State University, Civil Engineering, Raleigh, North Carolina, USA, 2009.

JIANG, J.; NI, F.; WU, F.; SADEK, H.; LV, Q. Evaluation of the healing potential of asphalt mixtures based on a modified semi-circular bending test. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 196, p. 284-294, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.220>.

JOSEPH, M.S., BINDU, C.S. Investigation of warm mix asphalt with cashew nut shell liquid: a sustainable green mix. *Innov. Infrastruct. Solut.* 7, 251 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00852-6>

JWAIDA *et al.* The self-healing performance of asphalt binder and mixtures: a state-of-the-art review. *Innov. Infrastruct. Solut.* 9, 247 (2024). <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01547-w>

KACHKOUCH, F. Z.; NOBERTO, C. C.; BABADOPULOS, L. F. A.; MELO, A. R. S.; MACHADO, A. M. L.; SEBAIBI, N.; BOUKHELF, F.; MEDILI, Y. Fatigue behavior of concrete: a literature review on the main relevant parameters. *Construction and Building Materials.* v. 338, e-127510. 2022.

Kim, Y. R., Daniel, J. S., e Wen, H. (2002) Fatigue Performance Evaluation of Westrack Asphalt Mixtures Using Viscoelastic Continuum Damage Approach.

Kim, Y.R. (2009) Modeling of Asphalt Concrete. Mc Graw Hill.

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

LI, Y.; HAO, P.; LI, N. Preparation and properties of a novel rejuvenator-loaded fiber for asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 2022.

LOPES, L. N. Fadiga e deformação permanente em ligante e mistura asfáltica modificados com borracha pré-tratada (RAR). Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de Brasília. Brasília 3 DF. 2022.

LUZZI, F. C. Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

MACEDO, Ana Letícia Feitosa de. Avaliação da capacidade de regeneração de misturas asfálticas recicladas com óleo de algodão residual encapsulado. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2025.

MANGIAFICO, S.; SAUZÉAT, C.; & DI BENEDETTO, H. (2019). Comparison of different blending combinations of virgin and RAP-extracted binder: Rheological simulations and statistical analysis. *Construction and Building Materials*, 197, 454–463. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.217

MANSOURKHAKI, A.; AMERI, M.; HABIBPOUR, M.; AND UNDERWOOD, B., S. (2020). Chemical Composition and Rheological Characteristics of Binders Containing RAP and Rejuvenator. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(4): 04020026. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003016

MAZZETO, S. E., LOMONACO, D. Óleo da castanha de Caju: Oportunidade e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial. *Química Nova.*, n. 3, V. 32, P. 7732-741, 2009.

MELO NETO, Osires de Medeiros. Abordagem multidimensional de misturas asfálticas com elevado teor de rap rejuvenescidas com óleo de babaçu. 2025. 336 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2025.

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. 7343744, 2016.

MOCELIN, D. M. (2018) Avaliação do Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas Quentes e Mornas Através do Modelo de Dano Contínuo Viscoelástico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Mollamohammadi, A. Hesami, A. S. Evaluation of the Effect of WCO/SBS-Modified RAB and RAP and Stiffness Recovery Procedure on Fatigue Performance of HMA. 2023. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 35. N 2. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004567

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. 116831180, 2023.

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.

NASCIMENTO, L. A. H. (2015) Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. Tese de Doutorado, North Carolina State University.

NEMATI, R.; DAVE, E. V.; SIAS, J. E. Development of Complex Modulus-Based Rutting Index Parameter for Asphalt Mixtures. *Journal of Transportation Engineering*. v. 146, n.2, 04020026. 2020. DOI: doi:10.1061/JPEODX.0000171.

OLIVEIRA, A. H. Avaliação do potencial antioxidante do líquido da castanha de caju (LCC) para materiais asfálticos através de diferentes métodos de envelhecimento. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2014.

OLIVEIRA, L. S. de. Efeito dos períodos de repouso no ensaio de fadiga em misturas asfálticas e em ligantes. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2019.

OLIVEIRA, M. S. Análise da fadiga em misturas asfálticas recicladas a quente. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade de Brasília. Brasília – DF. 2021.

OLIVEIRA, L. S.; LUCAS JUNIOR, L. O.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; SOARES, J. B. Stiffness and fatigue evaluation in cyclic tests with rest periods for asphalt mixtures with or without fly ash. *Construction and Building Materials*. v. 322, e-126426. 2022.

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.

PHILLIPS, M.C. Multi-step models for fatigue and healing, and Binder properties involved in healing. Anais do Eurobitume Workshop on Performance Related Properties for Bituminous Binders, Luxemburgo, 1998.

PINTO, S. (1991) Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

PIVETTA, F. C., NASCIMENTO, L. A. H.,BRITO, L. A. T. (2020). Proposta de protocolo de ensaio para análise de regeneração em misturas asfálticas através do modelo S-VECD. *Transportes*, 28(4), 38–52. <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i4.2028>

PLESCAN, E. L.; PLESCAN, C. Asphalt Pavement Recycling. Bulletin of the Transilvania University of Braşov. v. 8, n. 1, p. 265-270. 2015.

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. 8643870, 2013.

QUEIROZ, R. F. R. Avaliação do dano por fadiga de misturas asfálticas modificadas por adição de polímero a partir do modelo S-VECD. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande 3 PB. 2022.

RATHORE, Mukul; ZAUMANIS, Martins. Impact of laboratory mixing procedure on the properties of reclaimed asphalt pavement mixtures. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 264, p. 120709, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820327148>.

RIBEIRO, E. A. O efeito da modificação de ligante asfáltico com o líquido da castanha de caju (LCC) na resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2011.

SAHEBZAMANI, H., MOHAMMAD Z. A.; ORANG F.; ALI M. Laboratory and Field Investigation of the Effect of Polymerized Pellets on the fatigue and Low-temperature Performance of Asphalt Mixtures. *Construction & Building Materials*. v. 323, 126527. 2022.

SCHUSTER, S. L. Estudo Do Comportamento À Fadiga De Misturas Asfálticas Aplicadas Em Campo Por Meio Da Teoria Viscoelástica De Dano Contínuo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2018.

SHIRZAD, S.; HASSAN, M. M.; AGUIRRE, M. A.; MOHAMMAD, L. N.; COOPER JUNIOR, S.; NEGULESCU, J. L. Rheological properties of asphalt binder modified with recycled asphalt materials and light-activated self-Healing polymers. *Construction and Building Materials*. v. 220, p. 187-195. 2019.

SILVA *et al.* Assessing the efficacy of alginate-encapsulated rejuvenators from soybean oil sludge and fatty acid for enhanced self-healing capacity of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, [s. l.], v. 0, n. 0, p. 1–25, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2338778>.

SILVA, Ingridy Minervina. Análise do efeito de agentes rejuvenescedores encapsulados na autorregeneração da mistura asfáltica. 2022. 144 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2022.

SOUZA, C. R. R. R. ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS QUENTES E MORNAS PRODUZIDAS COM RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) USANDO A ABORDAGEM DE DANO CONTÍNUO VISCOELÁSTICO. 2023. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

SUN D.; SUN G.; ZHU X.; GUARIN A.; LI B.; DAI Z.; LING J. A comprehensive review on self-healing of asphalt materials: mechanism, model, characterization and

enhancement. *Advances In Colloid And Interface Science*, v. 256, p. 65-93, 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2018.05.003>.

SUN, D.; SUN, G.; ZHU, X.; PANG, Q.; YU, F.; LIN, T. Identification of wetting and molecular diffusion stages during self-healing process of asphalt binder via fluorescence microscope. *Construction and Building Materials*, v. 132, p. 230-239, 2017.

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.

SUZUKI, K., Y. (2019). Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente com diferentes teores de Material Fresado. Dissertação de Mestrado– Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

SUZUKI, Karina *et al.* Evaluation of recycled asphalt mixtures with different RAP contents and the effect of recycling agent. *Road Materials and Pavement Design*, [s. l.], v. 0, n. 0, p. 1–13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2191739>. Acesso em: 29 dez. 2023.

TORRES *et al.* Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual. *TRANSPORTES*, [s. l.], 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.

TURSI, Antonio. A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion. *Biofuel Research Journal*, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 962–979, 2019. Disponível em: https://www.biofueljournal.com/article_88067.html.

UCHOA *et al.*, Investigating the efficacy of bio-rejuvenators in restoring aged asphalt binder properties, *Construction and Building Materials*, Volume 446, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137948>.

UNDERWOOD, B. S.; BAEK, C.; KIM, Y. R. Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis. *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*. v. 2296, p. 35-45, 2012.

WAN *et al.* Study on the rejuvenator release property of calcium alginate capsules within asphalt concrete under different cyclic load modes, *Construction and Building Materials*, Volume 458, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139508>

WANG, Y. D.; GHANBARI, A.; UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. Development of a Performance-Volumetric Relationship for Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record*. v. 2673, n. 6, p. 416-430. 2019.

WANG, Y; HAO, P. Rheological and fatigue-healing durability of asphalt containing synthesized microcapsules with refined waste oil core, *Construction and Building Materials*, Volume 274, 2021, 121964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121964>.

WOOL, R. P.; O'CONNOR K. ε. A Theory of Crack Healing in Polymers. *Journal of Applied Physics*, v 52, n. 10, p. 5953–5963, 1981.

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.

XIAO *et al.*, Recent applications and developments of reclaimed asphalt pavement in China, 2010–2021, *Sustainable Materials and Technologies*, Volume 37, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00697>.

XIN, Q.; WEIHAO, C.; WNYI, X.; SHANGLIN, X. Fatigue evolution characteristic and self-Healing behaviour of asphalt binders. *International Journal of Pavement Engineering*. v. 23, n.5. 2022.

XU, S.; GARCÍA, A.; SU, J.; LIU, Q.; TABAKOVIC, A. Self-Healing Asphalt Review: From Idea to Practice. *Advanced Materials Interfaces*. 1800536, p. 1–21, 2018

XUE, B.; WANG, H.; PEI, J.; LI, R.; ZHANG, J.; FAN, Z. Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt. *Construction And Building Materials*, v. 135, p. 641-649, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.165>.

LIANG,Y, WU, R. HARVEY, JT. JONES, D. ALAVI, MZ. Investigação sobre o envelhecimento oxidativo de ligantes

YANG, S.; JIANG, J.; LENG, Z.; NI, F. Feasibility and performance of the Semi-circular Bending test in evaluating the low-temperature performance of asphalt mortar. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 269, p. 121305, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121305>.

YE *et al.*, Enhancing self-healing of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregates and reclaimed asphalt pavement using induction heating, *Construction and Building Materials*, Volume 439, 2024,137361, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137361>.

ZHANG *et al.* A new short-term aging model for asphalt binders based on rheological activation energy. *Materials and Structures*, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 68, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1364-7>.

ZHAO *et al.* A comparative study of the effects of calcium alginate capsules on self healing properties of base and SBS modified asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, Volume 364, 2023, 129908, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129908>.

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.