



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LETÍCIA SALES MEDEIROS

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS COM BIOLIGANTE DERIVADO DO LÍQUIDO DA CASCA DA
CASTANHA DE CAJU ACRILADO (LCCA)**

FORTALEZA

2026

LETÍCIA SALES MEDEIROS

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS COM BIOLIGANTE DERIVADO DO LÍQUIDO DA CASCA DA
CASTANHA DE CAJU ACRILADO (LCCA)

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Sidney Bessa.

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M439 Medeiros, Letícia Sales.

Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas modificadas com bioligante derivado do líquido da casca da castanha de caju acrilado (LCCA) / Letícia Sales Medeiros. – 2026.
59 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Iuri Sidney Bessa.

1. Desempenho mecânico. 2. Dimensionamento mecanístico-empírico. 3. Pavimentação sustentável. 4. Líquido da casca de castanha de caju acrilado. I. Título.

CDD 620

LETÍCIA SALES MEDEIROS

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MODIFICADAS COM BIOLIGANTE DERIVADO DO LÍQUIDO DA CASCA DA
CASTANHA DE CAJU ACRILADO (LCCA)

Projeto de Graduação apresentado ao curso de
Graduação em Engenharia Civil do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Engenheiro Civil.

Aprovada em: 22/01/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Iuri Sidney Bessa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Me. Lívia Ingrid de Oliveira Costa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Jardel Andrade de Oliveira
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, a Deus, por me manter de pé ao longo de toda essa trajetória, concedendo saúde física e mental, força e sabedoria para enfrentar os desafios e seguir firme até a conclusão deste trabalho e finalização dessa etapa tão importante.

Aos meus pais, pelo amor, apoio constante, incentivo diário e por nunca medirem esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Aos meus tios e demais familiares, pelo carinho, pelas palavras de encorajamento e por acreditarem em mim ao longo de toda essa caminhada.

Ao meu namorado, Levi, pelo companheirismo, paciência e apoio diariamente. Pelo incentivo, pela confiança e por me encorajar a seguir em frente, inclusive nos momentos de incerteza, sendo essencial para que eu mantivesse a motivação ao longo dessa trajetória.

Ao meu orientador, Professor Dr. Iuri Sidney Bessa, pela orientação, dedicação, disponibilidade, incentivo e valiosas contribuições ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, fundamentais para o amadurecimento acadêmico e científico deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de Iniciação Científica, que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa, contribuindo de forma essencial para minha formação acadêmica e científica.

Ao Rômulo, técnico do laboratório, pelos serviços prestados, pela parceria durante a pesquisa, pela disponibilidade e pelo suporte técnico indispensável para a realização dos ensaios e atividades experimentais.

Aos amigos que a faculdade me deu, em especial Fernando, Lucas, Thayne e Werleson, pelo incentivo, apoio e amizade ao longo dessa caminhada, estando presentes nos momentos importantes e contribuindo para que essa trajetória fosse mais leve e significativa.

Às minhas melhores amigas, Camila, Ana Luíza e Letícia Trajano, pelo apoio, amizade, companheirismo e por estarem presentes ao longo de toda essa jornada.

A todos os profissionais da Engenharia Civil com quem tive a oportunidade de conviver durante os estágios, agradeço pelas experiências compartilhadas, pelos ensinamentos práticos e fundamentais para a construção da minha base técnica e profissional.

Ao corpo docente do curso, pelos ensinamentos transmitidos ao longo dos cinco anos de formação, que contribuíram para minha formação acadêmica e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e para a conclusão desta importante etapa da minha vida acadêmica.

*“Tenha ganância para chegar onde desejas,
mas mantenha a humildade para lembrar de
onde veio.”*

*“Que as mulheres, em todos os lugares,
descubram dentro de si, a força para se
levantar, a coragem para falar,
a visão para transformar
e a fé de que seus dons são necessários
para renovar o mundo.
Que elas confiem no poder que carregam
e caminhem com ousadia rumo ao futuro,
com inteligência, dignidade e esperança.”*
(Joan Chittister)

RESUMO

A simulação da evolução de defeitos ao longo da vida útil de pavimentos, aliada ao uso de ferramentas computacionais, é essencial para o desenvolvimento de infraestruturas resilientes e sustentáveis, visando o desenvolvimento de métodos que aprimorem a conservação da malha viária dentro da pavimentação sustentável. O trabalho presente avalia a eficácia técnica do bioaditivo resíduo do Líquido da Casca da Castanha de Caju acrilado (LCCA) como modificador do ligante asfáltico puro CAP 50/70, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 9 e 11) da ONU. A metodologia consistiu na comparação entre uma mistura asfáltica de referência CBUQ e uma mistura asfáltica modificada com o teor de 2% de LCCA, utilizando o *software* MeDiNa para prever o desempenho mecânico sob um tráfego de número N igual a 1×10^7 . Para garantir a isonomia na análise fundamentada no dimensionamento mecanístico-empírico, foi aplicada a função do MeDiNa de avaliação de estrutura no cenário modificado, mantendo-se as mesmas espessuras da seção de referência. Os resultados demonstram que a modificação química promoveu ganhos significativos nas propriedades mecânicas, elevando os valores de módulo de resiliência e de resistência à tração por compressão diametral, além da melhoria na classe de fadiga da mistura. Diferente de um enrijecimento danoso, a combinação entre o incremento de rigidez e a coesão interna resultou em uma redução na previsão da área trincada estimada do pavimento. Quanto à deformação permanente, a simulação do LCCA apresentou um baixo afundamento de trilha de roda, mostrando-se eficaz na proteção das camadas granulares subjacentes. Conclui-se que o uso de 2% de bioaditivo LCCA é uma alternativa promissora e tecnicamente superior, otimizando o consumo de recursos não renováveis e garantindo uma durabilidade estrutural substancialmente maior frente aos métodos convencionais.

Palavras-chave: pavimentação sustentável; líquido da casca da castanha de caju; dimensionamento mecanístico-empírico; desempenho mecânico.

ABSTRACT

The simulation of distresses evolution throughout the service life of pavements, combined with the use of computational tools, is essential for developing resilient and sustainable infrastructure aiming at the development of methods that improve road network conservation within the framework of sustainable paving. The present study evaluates the technical efficacy of a bio-additive derived from acrylate cashew nutshell liquid (CNSL) as a modifier for neat CAP 50/70 asphalt binder, aligning with the UN Sustainable Development Goals (SDG 9 and 11). The methodology consisted in a comparison between a reference asphalt mixture and a modified asphalt mixture with 2% LCCA, by means of the MeDiNa software to predict mechanical performance and structural behavior under a traffic load of 1×10^7 equivalent single axle loads (ESALs). To ensure parity in the analysis based on the mechanistic-empirical design, the structural evaluation function was applied to the modified scenario, maintaining the same layer thicknesses as the reference section. The results demonstrate that the chemical modification promoted significant gains, increasing the resilience modulus value and the tensile strength. Contrary to a detrimental stiffening effect, the combination between the increased stiffness and internal cohesion resulted in a decrease in the predicted cracked area of the pavement. Regarding permanent deformation, the LCCA scenario showed a low value of rutting, proving effective in protecting the underlying granular layers. The main conclusion is that the use of the 2% LCCA bio-additive is a promising and technically superior alternative, optimizing the consumption of non-renewable resources and ensuring substantially higher structural durability compared to conventional methods.

Keywords: sustainable paving; cashew nutshell liquid; mechanistic-empirical design; mechanical performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das atividades realizadas no projeto	27
Figura 2 - Determinação da TU e TC a partir da curva de viscosidade.....	32
Figura 3 - Síntese do Líquido da Casca da Castanha de Caju Acrilado (LCCA)	34
Figura 4 - Ensaio de Resistência à Tração na Prensa Marshall 30kN	35
Figura 5 - Ensaio de Módulo de Resiliência na RiO 30 kN/30 Hz	37
Figura 6 - Corpo de prova condicionado no ensaio de DUI.....	38
Figura 7 - Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral na UTM-30.....	39
Figura 8 - Sub camadas e subleito utilizados na simulação das misturas.....	42
Figura 10 - Esquema de trinca isolada (a) e sua imagem real (b)	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Faixa granulométrica utilizada nas misturas asfálticas (DNIT 031/2024)	29
Gráfico 2 - Resultados dos ensaios de RT para as duas misturas asfálticas	45
Gráfico 3 - Resultados dos ensaios de MR para as duas misturas asfálticas	47
Gráfico 4 - Curva de fadiga das misturas asfálticas	49
Gráfico 5 - Classe de fadiga das misturas asfálticas.....	50
Gráfico 6 - Representação da evolução da área trincada.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Proporção de material para dosagem de mistura asfáltica	29
Tabela 2 – Densidade relativa máxima medida da mistura não compactada por teor de ligante	31
Tabela 3 - Características dos ligantes e agregados utilizados	33
Tabela 4 - Características do ligante modificado utilizado.....	34
Tabela 5 - Análise estatística os valores de MR por linguagem Python.....	47
Tabela 6 - Resultados ensaio de fadiga para a mistura de referência	48
Tabela 7 - Resultados ensaio de fadiga para a mistura modificada	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Análise do Ciclo de Vida
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
AT%	Área Trincada (percentual)
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBUQ-M	Concreto Betuminoso Usinado a Quente - Mistura asfáltica (com CAP 50/70 e agregados)
CD	Compressão Diametral
CNSL	<i>Cashew Nut Shell Liquid</i>
CP	Corpo de Prova
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
F2	Dano por Umidade Induzida
F3	Função de Dimensionamento no software MeDiNa
FC	Função de Avaliação de estrutura no software MeDiNa
FFM	Fator de Fadiga da Mistura
FV	Fator de Veículo
GMB	<i>Bulk Specific Gravity</i>
GMM	<i>Maximum Measured Specific Gravity</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IRR	Índice de Retenção de Resistência
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LA	Ligante Asfáltico
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LCC	Líquido da Casca da Castanha de Caju
LCCA	Líquido da Casca da Castanha de Caju Acrilado
LG'	Solo fino de comportamento laterítico
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>

MA	Mistura Asfáltica
MC	<i>Medium Curing</i>
ME _m	Massa Específica Máxima Medida
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MM	Mistura Modificada
MP	Material Particulado
MR	Módulo de Resiliência
MREF	Mistura de Referência (Convencional)
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
N	Número de solicitações de eixo padrão (volume de tráfego)
N _f	Vida de Fadiga (Número de ciclos até a falha)
NS'	Solo de comportamento não laterítico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
RRT	Resistência à Tração Retida
RT	Resistência à Tração por compressão diametral
SBS	<i>Styrene-Butadiene-Styrene</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal (dos agregados)
TSR	<i>Tensile Strength Ratio</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
V _v	Volume de Vazios

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1.	<i>Problema de pesquisa e questões motivadoras</i>	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1.	<i>Sustentabilidade na pavimentação rodoviária</i>	18
2.1.1	<i>Uso de materiais alternativos nas misturas asfálticas</i>	20
2.1.1.1	<i>Utilização de bioaditivos na pavimentação</i>	21
2.1.1.1.1	<i>.Concepção de bioaditivos a partir do Líquido da Casca da Castanha de Caju (LCC)</i>	22
2.1.1.1.1.1Líquido da casca da castanha de caju acrilado (LCCA)	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	<i>Representação das atividades realizadas</i>	26
3.2	<i>Materiais</i>	28
3.3	<i>Ensaio laboratoriais</i>	28
3.4	<i>Metodologia</i>	34
3.4.1	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	34
3.4.2	<i>Módulo de Resiliência</i>	36
3.4.3	<i>Dano por Umidade Induzida</i>	37
3.4.4	<i>Fadiga por compressão diametral (CD)</i>	39
3.4.5	<i>Método mecanístico-empírico</i>	40
3.4.6	<i>Vantagens e fundamentação do potencial sustentável do bioaditivo</i>	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5	CONCLUSÃO.....	55
	REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

O setor de infraestrutura viária possui um papel fundamental na qualidade de vida da sociedade, bem como no crescimento econômico. Sob esse viés, os objetivos de desenvolvimento sustentáveis da Organização das Nações Unidas (ONU) têm como uma de suas metas o desenvolvimento de infraestrutura resilientes e duráveis, buscando o bem estar humano (ODS 9), além da garantia de sustentabilidade nas comunidades (ODS 11). No Brasil, em decorrência de suas extensas dimensões, a infraestrutura de transportes é imprescindível para o transporte de bens e pessoas.

Nesse contexto, a conscientização ambiental e a busca por alternativas sustentáveis em obras da engenharia civil têm gerado um interesse renovador na pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e tecnologias para pavimentação (Gondim, 2017; Andrade, 2019; Oliveira, Farias e Silva, 2022). Uma vertente promissora diz respeito à utilização de bioaditivos derivados de óleos provenientes de vegetais com o escopo de aprimorar propriedades dos ligantes asfálticos (LA). Segundo Zhang *et al.* (2022), existem estudos diversos que corroboram a utilização de bioaditivos derivados de óleos vegetais com grande potencial para uso como modificadores ou regeneradores de asfalto com desempenho satisfatório.

A durabilidade e o desempenho dos pavimentos estão diretamente relacionados à capacidade de resistir a diferentes tipos de solicitações ao decorrer do tempo. Dentre as principais patologias observadas nas rodovias brasileiras, destacam-se o trincamento por fadiga e a deformação permanente (Silva *et al.*, 2008), fenômenos que comprometem, de forma significativa, a vida útil do revestimento e a segurança dos usuários. A primeira refere-se à formação progressiva de trincas, geralmente, iniciada na base da camada do pavimento e propagando-se em direção à superfície, esse processo é decorrente da repetição de cargas de tráfego ao longo do tempo, especialmente em regiões em que a estrutura do pavimento é insuficiente para distribuir adequadamente os esforços induzidos pelos veículos. No Brasil, onde a malha rodoviária carece de manutenção adequada, há recorrência dessa falha, reduzindo não apenas o conforto e segurança dos usuários, bem como favorecendo a infiltração de água, cujo processo acelera a degradação do pavimento.

No que concerne à deformação permanente, ela é causada pelo acúmulo irreversível de tensões nas camadas do pavimento, especialmente nas regiões superiores compostas por materiais betuminosos. Pode ser identificada por meio de trilhas de roda, isto é, afundamentos longitudinais, sendo agravada pelas altas temperaturas e pelo tráfego intenso dos veículos comerciais. Esse fenômeno ocorre quando a mistura asfáltica não apresenta resistência

suficiente ao fluxo viscoso ou à fluência sob cargas repetidas. Ambas as patologias citadas, intensificam os custos com manutenção e reabilitação, comprometem a eficiência logística, refletindo diretamente na economia do país.

A alta incidência desses problemas evidencia a necessidade de se investir em materiais inovadores, como modificadores de ligantes asfálticos (ex.: polímeros, borrachas, bioaditivos), capazes de melhorar o desempenho mecânico das misturas asfálticas frente às solicitações térmicas e mecânicas. O crescente foco na sustentabilidade em obras de engenharia tem impulsionado o desenvolvimento de alternativas inovadoras na infraestrutura viária. Neste contexto, a investigação do uso de bioaditivo derivado do Líquido da Casca da Castanha de Caju (LCC) na modificação de ligantes asfálticos, objetifica reduzir impactos ambientais e aumentar a durabilidade dos pavimentos. O LCC possui compostos fenólicos naturais que podem reagir com acrilatos, ao modificá-lo com acrilado, espera-se um bioaditivo mais estável e funcional. Portanto, soluções sustentáveis como os bioaditivos derivados de fontes renováveis, buscam viabilizar a contribuição para a construção de pavimentos mais duráveis e alinhados aos princípios da engenharia sustentável.

A distinção fundamental entre os modificadores convencionais e os bioaditivos reside na origem da matéria-prima e no impacto reológico gerado na matriz asfáltica. Enquanto aditivos poliméricos sintéticos (como o SBS) e resíduos sólidos (borracha e plásticos) focam no enrijecimento da estrutura coloidal para elevar o Módulo de Resiliência (MR) e mitigar a deformação permanente, eles frequentemente demandam altas temperaturas de usinagem e podem induzir um comportamento frágil, reduzindo a vida de fadiga devido à baixa compatibilidade termodinâmica (Bernucci *et al.*, 2022).

Em contrapartida, bioaditivos como o LCC atuam como agentes plastificantes de base renovável, possuindo afinidade química superior com as frações maltênicas do ligante. Essa interação promove uma redução na viscosidade aparente, facilitando a compactação em temperaturas reduzidas e preservando a capacidade de dissipação de energia da mistura (Bindu *et al.*, 2020). Assim, enquanto os aditivos poliméricos priorizam a rigidez estrutural, os bioaditivos oferecem uma resposta viscoelástica mais equilibrada e sustentável, resultando em maior resistência ao dano por umidade e à fadiga, parâmetros essenciais para a longevidade prevista em métodos mecanicistas como o MeDiNa.

O principal objetivo desta pesquisa é investigar o impacto do Líquido da Casca da Castanha de Caju Acrilado (LCCA), um aditivo derivado de fontes renováveis, mas com certa alteração química, como bioaditivo modificador aplicado ao ligante asfáltico da mistura asfáltica, observando como os efeitos de variáveis, com uma concentração do LCCA (2%),

tempo e temperatura de usinagem, e seu comportamento com os materiais da composição, focando no desempenho mecânico, especialmente, o trincamento por fadiga, ou seja, a durabilidade dos pavimentos, com vistas a avaliar a eficácia na promoção de uma infraestrutura viária mais sustentável, visando reduzir os danos de defeitos comuns em pavimentações e, por fim, verificar o impacto do uso de LCCA, avaliando as vantagens da sua utilização nas misturas asfálticas. Ressalta-se ainda que, para cumprimento do objetivo, foram realizados ensaios mecânicos, são eles: RT, MR, DUI, Fadiga CD, ambos apresentados na metodologia do presente trabalho.

1.1. Problema de pesquisa e questões motivadoras

Por esse viés, o setor de pavimentação rodoviária enfrenta o desafio crítico de mitigar sua contribuição negativa para a qualidade do ar, resultante da produção de poluentes atmosféricos durante o aquecimento de materiais asfálticos. A busca por pavimentos sustentáveis tem impulsionado o uso de materiais alternativos, com os bioaditivos, como o LCC na modificação desses ligantes asfálticos, visto que o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) por ser uma fração pesada da destilação do petróleo, o ligante exige elevadas temperaturas de usinagem. Sua composição, predominantemente formada por hidrocarbonetos (90 a 95%) e heteroátomos de nitrogênio e enxofre (Bernucci *et al.*, 2022), potencializa a liberação de emissões nocivas quando submetida ao calor, tornando a busca por alternativas que reduzam esse impacto uma necessidade urgente para a sustentabilidade da infraestrutura viária. Somada à preocupação ambiental, a integridade estrutural das vias impõe desafios adicionais à engenharia de materiais.

Nesse contexto, a fadiga é um dos principais mecanismos de deterioração das misturas asfálticas, sendo responsável pela iniciação e propagação de trincas que reduzem significativamente a vida útil do pavimento. Assim, a incorporação desses agentes, não visa apenas a sustentabilidade como também é capaz de alterar substancialmente propriedades viscoelásticas e também a resistência ao acúmulo de danos das misturas, impactando diretamente a vida útil da estrutura.

Ainda sob esse cenário, o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) apresenta-se como uma ferramenta relevante, pois seu modelo mecanístico-empírico incorpora explicitamente dados experimentais de fadiga obtidas em laboratório para estimar a vida de serviço da estrutura, tornando essencial validar o desempenho de novos materiais através de métodos de dimensionamento modernos Dessa forma, ao contrário de outros métodos que

tratam a fadiga de forma indireta, o MeDiNa permite utilizar diretamente parâmetros mecânicos obtidos em ensaios, como módulo de resiliência e parâmetros das curvas de fadiga, refletindo com maior precisão o comportamento real das misturas.

Assim, é possível avaliar de forma sistemática como o bioaditivo estudado influencia a na vida útil da estrutura, oferecendo uma base objetiva para comparar o desempenho de formulações sustentáveis frente às convencionais.

Ao integrar parâmetros obtidos em ensaios de fadiga por compressão diametral, o MeDiNa permite simular como a inclusão de bioaditivos retarda a evolução do dano, transformando dados experimentais em estimativas reais de vida de serviço. Essa análise integrada é essencial para validar a viabilidade técnica e a durabilidade de pavimentos formulados com baixo impacto ambiental.

Paralelamente, a incorporação de uma avaliação de vantagens do uso estudo de materiais asfálticos auxilia em uma futura Análise do Ciclo de Vida (ACV), cujo estudo vem se consolidando como ferramenta essencial para quantificar impactos ambientais, problemática mencionada anteriormente, associados à produção, aplicação e manutenção de estruturas de pavimentos, permitindo avaliar a sustentabilidade de diversas soluções, como é o caso do uso de bioaditivos.

Diante da diversidade climática, do tráfego variável e das particularidades dos materiais utilizados no Brasil, ainda são minuciosos os estudos que integrem, de forma consistente, o desempenho à fadiga e os impactos ambientais. Assim, investigações que considerem simultaneamente essas duas dimensões são fundamentais para orientar o desenvolvimento de misturas mais duráveis e ambientalmente eficientes, especialmente no contexto da aplicação de bioaditivos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é composto por um levantamento de trabalhos científicos relacionados ao tema desta pesquisa, abordando a utilização de bioaditivos associados ao ligante asfáltico convencional (CAP 50/70), os processos de modificação empregados, os efeitos dessa adição sobre o comportamento mecânico das misturas asfálticas e estudos relacionados à aplicação do Líquido da Casca da Castanha de Caju (LCC) como alternativa para misturas asfálticas.

2.1. *Sustentabilidade na pavimentação rodoviária*

A incorporação de ligantes de matriz sustentável nas misturas asfálticas representa uma alternativa promissora para a viabilização da pavimentação verde. Essa abordagem não apenas fomenta a economia circular no setor de infraestrutura, mas contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa, atuando diretamente nos passivos ambientais (Faria *et al.*, 2022). Do ponto de vista reológico, os modificadores também exercem influência no desempenho mecânico das misturas asfálticas, na resistência ao envelhecimento, na adesão aos agregados e na suscetibilidade térmica da mistura (Bernucci *et al.*, 2022). Conforme apontam Soares *et al.* (2017), a compatibilidade entre o bioaditivo e a fração do asfalto é crucial para garantir a estabilidade térmica da mistura sob diversas condições climáticas.

Estudos apontam que os ligantes modificados podem promover a redução da rigidez do ligante asfáltico, atuando como plastificantes naturais. Esse fenômeno é caracterizado pela redução da viscosidade aparente, o que possibilita a usinagem e aplicação das misturas asfálticas em temperaturas inferiores às convencionais, reduzindo o consumo energético do processo produtivo (Gomes *et al.*, 2019). Nesse cenário, a utilização de óleos vegetais residuais e biopolímeros tem demonstrado eficácia na melhoria da trabalhabilidade e na facilitação da compactação em campo, sem comprometer a estabilidade estrutural do pavimento, prolongando a vida útil da camada de rolamento (Santos *et al.*, 2021).

Ainda sob essa óptica, é importante salientar que essas modificações devem ser criteriosamente balanceadas para garantir que o ganho de flexibilidade e o avanço na sustentabilidade não comprometam ou resultem em perda de resistência à deformação permanente sob tráfego pesado.

A utilização de subprodutos agroindustriais tem demonstrado eficácia na melhoria da trabalhabilidade, facilitando a compactação em campo sem comprometer a integridade estrutural do pavimento, visto que a agroindústria é um dos seguimentos que mais produz

resíduos orgânicos atualmente no Brasil, o descarte desses produtos, muitas vezes, é feito de forma incorreta o que leva à poluição do meio ambiente e à impossibilidade de reutilização dos mesmos. Diante disso, foi elaborado um estudo com o objetivo avaliar as possíveis formas de reutilização dos resíduos agroindustriais como matéria-prima em substituições de formulações cosméticas, em panificação e em pavimentação (Silva *et al.*, 2020). Ademais, a partir de pesquisas nessa área, é possível tanto melhorar a qualidade dos produtos, quanto analisar formas de reaproveitamento e biotransformação de seus resíduos para diversas finalidades (Embrapa, 2020).

Uma lacuna importante a ser discutida diz respeito ao comportamento da emissão de poluentes durante o processo de usinagem e transporte das misturas asfálticas, pois a poluição não acontece apenas durante a obra, mas também em usinas e no momento em que esse material é transportado para campo. Sob essa óptica, os serviços de pavimentação trazem consigo passivos ambientais, em suma, fumos de asfalto (NO_2 e SO_2) e material particulado (MP), visto que, nesse processo, os agregados minerais são aquecidos a temperaturas entre 140 e 180°C, enquanto o ligante asfáltico também é submetido ao aquecimento para garantir a adequada adesão e a funcionalidade da mistura (Bernucci *et al.*, 2022).

Alcântara (2023) destaca que o volume de material produzido é um dos principais fatores que influenciam as emissões, consolidando o setor de pavimentação como importante fonte de particulados. Embora existam tecnologias de mitigação, como sistemas de exaustão e filtros, a adoção desses dispositivos nem sempre é economicamente viável, sobretudo em usinas de menor porte. Nesse viés, o segmento de pavimentação rodoviária contribui de forma negativa em termos da produção de poluentes atmosféricos, causando elevado impacto na qualidade do ar, principalmente devido ao uso de materiais asfálticos aquecidos (Ribeiro *et al.*, 2018). Sendo essa problemática bastante associada ao próprio ligante asfáltico, o CAP, derivado do petróleo, pois para a utilização do CAP, no processo de fabricação de misturas asfálticas, faz-se necessário que ele seja aquecido a altas temperaturas (na ordem de 150°C), de modo que sua viscosidade diminua e este se torne trabalhável. Logo, com o escopo de promover a sustentabilidade, a academia vem desenvolvendo estudos. A partir de 1996, diversas pesquisas voltaram-se à redução das temperaturas de usinagem e aplicação de misturas asfálticas, fundamentadas na premissa de que o aporte térmico é o fator determinante na geração de fumos asfálticos. Essa vertente tecnológica buscou mitigar a emissão de poluentes nocivos sem comprometer as propriedades do material.

Ainda segundo Ribeiro *et al.* (2018), a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) possui uma usina que conta com um silo adaptado, próximo ao tambor secador para que o

material produzido (cerca de toneladas por hora) não entre em contato com a chama que aquece os insumos, além de possuir, uma unidade filtrante que tem como objetivo minar emissões atmosféricas e reter partículas finas de agregados, apresentando concentrações elevadas de material particulado lançado na atmosfera, ultrapassando $848,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Fontenele *et al.* (2018) também realizaram estudo semelhante e obtiveram resultados dessas concentrações superiores aos obtidos na aplicação em campo e fatores como a temperatura, a ventilação do local de aplicação e a quantidade de material utilizado influenciam na emissão desses poluentes. Além disso, o transporte, desde o carregamento da usina até o local de aplicação, também apresentou concentrações elevadas dos óxidos em poucas horas, cerca de $920 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em um dia, devido à elevadas temperaturas das misturas asfálticas ($150\text{-}170^\circ\text{C}$).

Diante da necessidade de práticas de pavimentação menos agressivas, este estudo promove investigações sobre a incorporação de bioaditivos, propondo-os como uma alternativa estratégica para reduzir o impacto ambiental sem comprometer o desempenho mecânico dos ligantes.

2.1.1 Uso de materiais alternativos nas misturas asfálticas

Os modificadores utilizados em ligantes asfálticos, como polímeros e borrachas, destacam-se no que diz respeito ao aprimoramento do comportamento mecânico de pavimentos (Lo Presti, 2013). Tais aditivos demonstram-se eficazes tanto na resposta elástica do asfalto quanto na manutenção da integridade estrutural dos pavimentos, ressaltando-se que interação desses modificadores com o ligante pode ocorrer de forma química ou física, dependendo do tipo de polímero empregado (Lo Presti, 2013).

A utilização de LA modificado por polímeros pode reduzir a incidência de deformação permanente, trincamento por fadiga e desagregação, promovendo o aumento da vida útil do revestimento (Rodrigues, 2010). O desempenho do pavimento está relacionado com as propriedades do LA e, dessa forma, pesquisas conduzidas em campo indicam que a adição de polímeros pode resultar em acentuada diminuição, na emissão de derivados de benzeno, reduzindo o impacto ambiental. Embora o Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) seja um elastômero polimérico bastante utilizado em fins rodoviários (Polacco *et al.*, 2006), os asfaltos modificados com esse copolímero estão sujeitos a separação de fases, em decorrência da baixa compatibilidade entre o ligante e o polímero, impactando sua estabilidade coloidal. (Bringel, 2007; Rodrigues, 2010).

Nesse cenário, algumas pesquisas desenvolvidas na UFC têm explorado o uso de aditivos alternativos e bioaditivos para otimizar a compatibilidade e a estabilidade de ligantes modificados. Trabalhos conduzidos por Soares *et al.* (2017) demonstram que a reologia do ligante asfáltico modificado não apenas melhorar a adesividade ligante-agregado, mas também atua como agentes compatibilizantes em sistemas poliméricos, reduzindo a suscetibilidade térmica e o envelhecimento precoce. Além disso, as investigações realizadas no CT-Asfalto/UFC reforçam que a busca por materiais alternativos, como o Líquido da Castanha de Caju (LCC), alinha-se à necessidade de pavimentos mais resilientes e sustentáveis, capazes de suportar as condições severas de tráfego e clima das rodovias brasileiras (Silva, 2021).

Por conseguinte, segundo Felicetti *et al* (2022), com a necessidade de pavimentos que atendam às condições de volume e carga de tráfego cada vez maiores, novos materiais têm sido pesquisados em busca de melhorias no seu desempenho mecânico., investigando o comportamento mecânico de diferentes misturas asfálticas modificadas por polímero Polietileno Tereftalato (PET), por meio de uma avaliação estrutural do desempenho à fadiga do pavimento, a partir do MeDiNa. Cabe ainda salientar que a escolha do tipo de CAP utilizado para cada estudo influencia no comportamento do material, uma vez que o emprego de ligantes menos consistente, isto é, com menor dureza e rigidez, aumenta a resistência à fadiga do revestimento e a utilização de baixos teores de ligante torna a mistura mais rígida, o que reduz a sua resistência à fadiga. (NCHRP, 2011).

O uso de resíduos reciclados, como borracha de pneu triturado, na modificação de ligantes asfálticos é uma prática comum na pavimentação (Bernucci *et al.*, 2022), porém a incorporação de resíduos em misturas asfálticas ainda está caminhando e pode ser promissora, visto que são materiais inertes, resistentes, possuem boa estabilidade química e característica termoplástica compatível com o ligante asfáltico, permitindo então ser aquecido e resfriado (Silva *et al.*, 2021).

2.1.1.1 Utilização de bioaditivos na pavimentação

A busca por artificios sustentáveis tem crescido bastante, principalmente, no setor da engenharia, visto que, nele existem profissionais habilitados em diversas áreas com o escopo propor soluções para diversos problemas. Nesse viés, a engenharia de pavimentos impulsionou dedicação para aditivos mais sustentáveis, por exemplo: os bioaditivos, isso pode ser evidenciado por meio de diversos estudos propostos, cujo objetivo consiste em explorar

materiais provenientes de fontes renováveis e processos eficientes do ponto de vista ecológico na indústria da pavimentação. (Chen *et al.*, 2023a)

Os aditivos sustentáveis são derivados, por exemplo, microrganismos (como fungos e bactérias), biomassas vegetais (ex.: celulose), resíduos agrícolas (como bagaço de cana-de-açúcar, casca de banana, palha de milho), óleo de rícino e lignina (Leite *et al.*, 2012) e dejetos suínos processados (Fini *et al.*, 2011). Nesse sentido, o que diferencia cada um, é sua origem biológica, comparado aos aditivos convencionais à base de petróleo. (Chen *et al.*, 2023a; Rocha, 2024). É importante citar que os bioaditivos destacam-se como uma fonte, além de inovadora, com bastante recurso disponível para exploração, cuja finalidade é indiscutivelmente, reduzir o impacto ambiental, viabilizando o aproveitamento de recursos renováveis em substituição aos derivados de fontes fósseis, reforçando o potencial desses compostos na transição para uma economia mais verde e circular conforme demonstrado por Buratti *et al.* (2022). Estudos voltados à substituição integral dos ligantes asfálticos fundamentam-se, predominantemente, em duas frentes tecnológicas: o processamento termoquímico (como pirólise, destilação e liquefação) de diferentes biomassas e a formulação de ligantes sintéticos baseados na interação entre resinas e ácidos graxos (Gondim, 2017).

Um ligante vegetal pode ser classificado como um material da engenharia civil, formulado com substâncias vegetais, mantendo propriedades que se assemelham a um ligante tradicional, principalmente, a viscoelasticidade, sob um dado intervalo de temperaturas (Vasconcelos, 2010; Gondim, 2017). Segundo Metwaly (2010) e Gondim (2017), os bioligantes podem ser utilizados de três maneiras distintas, com o objetivo de reduzir o emprego de ligantes betuminosos: (i) como um ligante alternativo que substitui 100% do ligante asfáltico; (ii) como um extensor betuminoso, substituindo de 25 a 75%; ou ainda (iii) como um modificante, quando se substitui menos de 10% do ligante convencional.

2.1.1.1.1 *Concepção de bioaditivos a partir do LCC*

O LCC é um subproduto da indústria resultado do beneficiamento da amêndoa da castanha de caju, extraído da casca durante o processo de torrefação das castanhas, cujo nome conhecimento internacionalmente consiste em *Cashew Nut Shell Liquid* (CNSL). Sob esse viés, a agroindústria do caju configura-se como uma das grandes atividades socioeconômicas da região do nordeste brasileiro, principalmente, no estado do Ceará, considerando sua produção local e baixo custo. (Oliveira, 2015; Rocha, 2024). Sendo o Brasil um fornecedor de LCC para países como: Estados Unidos, Reino Unido e Japão. (França, 2007). A produção nacional de

castanha de caju foi estimada em 161 mil toneladas em 2025, com principais produtores sendo Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte (IBGE, 2025).

A pesquisa no âmbito está em crescente ascensão, corroborando a crescente importância de biomateriais na melhoria das propriedades do pavimento como uma solução durável. De acordo com estudos recentes sobre modificadores de asfalto à base de lignina, observa-se que a incorporação de lignina melhora significativamente a estabilidade térmica do ligante betuminoso, mantendo a integridade estrutural até temperaturas elevadas, na faixa de 200 a 220 °C, sem degradação significativa até cerca de 250 °C (Cheng *et al.*, 2020).

Segundo Andrade (2019), a modificação do ligante asfáltico 50/70 com derivados sintetizados do LCC, incluindo cardanol e versões hidrogenadas do biomodificador e funcionalizadas demonstraram viabilidade técnica e estabilidade térmica até 227°C, o objetivo seria incorporar grupamentos diversos na estrutura do LCC, analisando ainda o efeito dos aditivos nas propriedades físico-químicas, empíricas e reológicas do ligante. Embora as misturas (puras e modificadas) tenham preservado o comportamento newtoniano, isto é, sua viscosidade permanece constante, a funcionalização com grupamentos nitrados, o cardanol hidrogenado nitrado, promoveu maior consistência e resistência à deformação permanente, atendendo aos requisitos de tráfego pesado (70-H-XX) no ensaio de *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR), pois o ligante apresentou valores superiores de viscosidades, indicativo do aumento de consistência do componente da mistura. Por outro lado, a análise de fadiga via ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS) indicou que a modificação com LCC *in natura* oferece a melhor resposta contra o trincamento, evidenciando que a escolha do aditivo permite otimizar propriedades específicas do pavimento.

Convém ressaltar que os dois ensaios mencionados, são necessários na caracterização moderna de asfaltos (metodologia *Superpave*), porque simulam condições reais de tráfego e de clima para prever como a estrada se comporta ao longo dos anos. O ensaio MSCR tem por função prever a resistência à deformação permanente, utiliza-se um reômetro de cisalhamento dinâmico para aplicar carga no asfalto por 1 segundo (Fluência), repetindo isso várias vezes em níveis de pressões distintas, ou seja, ele, em suma, mede quanto do asfalto não voltou ao normal após o esforço, avaliando sua recuperação elástica. Outrossim, o LAS é um ensaio para prever a resistência à fadiga, submetendo o asfalto a oscilações que aumentam de intensidade progressivamente até que o material falhe e trinque internamente, ele avalia a capacidade do ligante de aguentar ciclos repetidos de carga sem trincar.

Conforme aponta Ribeiro (2011), a utilização do LCC como modificador do ligante 50/70 apresentou-se como uma solução eficaz para mitigar o desgaste prematuro causado pelo

dano por umidade em pavimentos. A adição de 2% de LCC ao CAP não apenas otimizou a trabalhabilidade do material, ao reduzir a viscosidade e as Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUC), como também potencializou a adesividade entre o ligante e os agregados graníticos. Avaliações mecânicas via ensaios Lottman e MR, aliadas ao Processamento Digital de Imagens (PDI), confirmaram que o LCC reduz, significativamente, o descolamento da película asfáltica, garantindo um desempenho superior e maior resistência à ação deletéria da água quando comparado a misturas convencionais ou com adição de cal.

2.1.1.1.1.1 Líquido da casca da castanha de caju acrilado (LCCA)

Os aditivos modificadores de desempenho aplicados a ligantes asfálticos, como polímeros e borrachas, constituem uma das principais estratégias investigadas para elevar a resistência dos pavimentos à fadiga e à deformação permanente (Lo Presti, 2013). Esses materiais não apenas ampliam a capacidade elástica do ligante, como também contribuem diretamente para o aumento da robustez estrutural das camadas asfálticas. A forma como esses modificadores interagem com o ligante pode ocorrer por meio de mecanismos físicos ou químicos, variando conforme o tipo de polímero incorporado (Lo Presti, 2013).

A acrilação do líquido extraído da casca da castanha de caju configura-se como uma escolha estratégica, considerando sua produção local e baixo custo, além de ser um subproduto da indústria da castanha. O Brasil produziu aproximadamente 161 mil toneladas em 2025 de castanha de caíu, com os estados do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte sendo os principais produtores (IBGE, 2025). Ela consiste na modificação química das hidroxilas fenólicas presentes em seus principais constituintes, como o cardanol, por meio da introdução de grupos acrílicos ($-\text{CH}=\text{CH}_2$). Essa funcionalização é realizada, geralmente, por meio de uma reação de esterificação com agentes como o anidrido acrílico ou cloreto de acrilóila, sob atmosfera inerte, na presença de catalisadores apropriados. O resultado é a formação de um bioaditivo acrilado com propriedades termorreativas, capaz de participar de processos de polimerização ou reticulação em matrizes poliméricas ou asfálticas (Maia, 2015; Chen *et al.*, 2023; Rocha, 2024). Embora, o LCC, primordialmente, atue com um agente mais fluído, promovendo adesão entre ligante-agregado, a acrilação permite uma formação de redes poliméricas, servindo como um “biopolímero” dentro da matriz asfáltica.

A incorporação do LCC associado a ligantes asfálticos tem sido estudada como estratégia para aprimorar propriedades reológicas, térmicas e antioxidantes do LA, contribuindo para o aumento da resistência ao envelhecimento, à deformação permanente e à fadiga das

misturas asfálticas. (Fernandes, 2011; Chen *et al.*, 2023a). A utilização do material representa uma convergência estratégica entre a química de polímeros sustentáveis e a infraestrutura rodoviária com bom desempenho. O LCCA destaca-se não apenas como um otimizador renovável, mas como um agente que pode reforçar o uso da estrutura e reinterpretar o uso de resíduos agroindustriais sob a ótica da economia circular.

A aplicação do bioaditivo em campo, por meio de incorporação direta ao ligante ou à mistura asfáltica, já foi previamente testada com resultados promissores. Foi realizado um estudo de campo no Ceará (2011), cujo objetivo era investigar o uso de uma mistura contendo 60% ligante asfáltico 50/70 e 40% LCC como *prime coat*, camada aplicada sobre a base granular antes da aplicação do revestimento asfáltico, para estradas de baixo volume de tráfego. Os ensaios mostraram que a mistura apresentou penetração e viscosidade adequadas para aplicação, com desempenho comparável ao tradicional *cutback* MC-30, mas com menor impacto ambiental. Esse último consiste em um tipo de ligante asfáltico líquido, usados frequentemente como *prime coat*, composto por, basicamente, asfalto diluído em um solvente, por exemplo: querosene, a sigla MC significa traduzindo “cura média” e o valor 30 indica a viscosidade aproximada dos produtos em segundos.

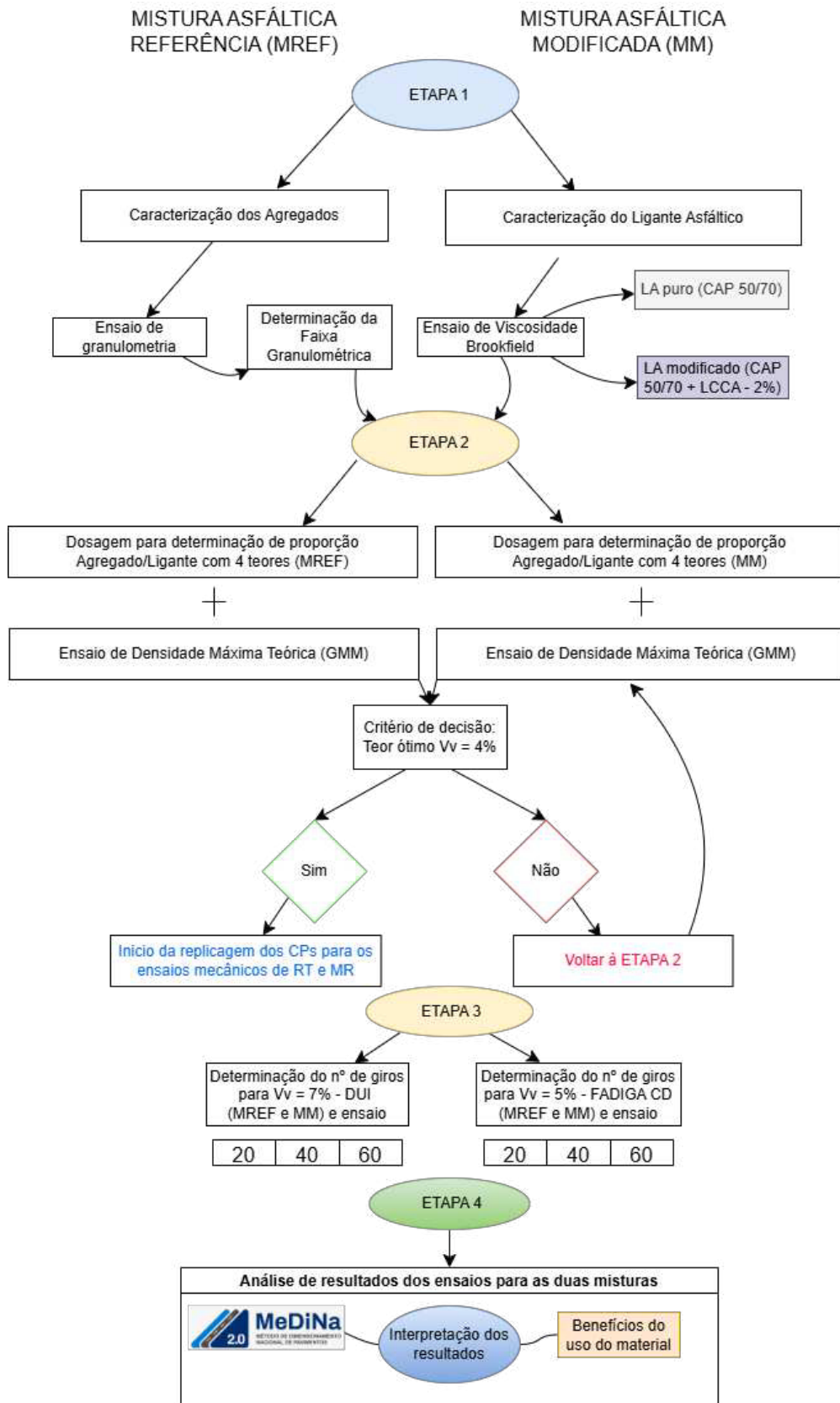
Conforme os ensaios laboratoriais realizados por Rocha (2024), a incorporação do bioaditivo LCCA-2% promoveu uma redução acentuada na viscosidade do ligante. Essa alteração favorece a penetração do material nos poros dos agregados e garante um revestimento mais ágil e eficiente, evidenciando uma menor sensibilidade térmica. Tal comportamento corrobora os achados de Uchoa *et al.* (2021), que atribuem essa maior fluidez a um efeito de lubrificação proporcionado pelos bioaditivos, o qual otimiza significativamente a trabalhabilidade da mistura asfáltica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 *Representação das atividades realizadas*

A Figura 1 representa as atividades desenvolvidas neste trabalho. O fluxograma é uma ferramenta essencial que confere clareza e rigor metodológico ao trabalho. Ele sintetiza visualmente a sequência de todas as etapas da pesquisa, desde a caracterização dos insumos até os ensaios de desempenho, permitindo ao leitor visualizar a lógica, a organização e a reprodutibilidade do planejamento experimental. A metodologia empregada neste estudo foi estruturada para garantir o rigor e a reprodutibilidade necessários à avaliação do desempenho do bioaditivo de LCCA com 2% de teor incorporado ao LA classificado como CAP 50/70.

Figura 1 - Representação das atividades realizadas no projeto



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

3.2 *Materiais*

Para utilizar os resultados experimentais de laboratório nas previsões de desempenho por meio de simulação computacional, foram produzidas duas misturas asfálticas diferentes: mistura asfáltica de referência (MREF) e a mistura asfáltica com aditivo LCCA (MM). As misturas foram produzidas utilizando um agregado graúdo de origem gnáissica, com Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,0 mm, conforme a graduação da Faixa B do DNIT e diferenciando seus ligantes asfálticos: um convencional (CAP 50/70) e um com aditivo no ligante (CAP 50/70 + LCCA 2%). Vale salientar que o processo de obtenção do material foi realizado no CT-Asfalto/UFC.

A composição granulométrica das misturas asfálticas (MREF e MM) foi delineada para atender aos limites da Faixa B da norma DNIT 031/2024-ES, característica de camadas de ligação (*binder*) em pavimentos asfálticos. A manutenção dessa mesma estrutura mineral em ambas as misturas permite isolar o efeito do bioaditivo (LCCA) sobre as propriedades mecânicas e a durabilidade do revestimento, garantindo a comparabilidade dos resultados sob uma granulometria padronizada.

A classificação granulométrica é crucial no projeto de pavimentos, pois determina as características físicas e a aplicação estrutural da mistura. A faixa B influencia diretamente a forma como tensões e deformações são distribuídas no pavimento, o que significa que qualquer alteração no LA, por exemplo, a incorporação de bioaditivos, pode modificar o comportamento estrutural dessa camada. Além disso, o uso de uma granulometria padronizada permite comparar de maneira mais rigorosa misturas convencionais e modificadas, isolando o efeito do bioaditivo sobre parâmetros essenciais como módulo, resistência à fadiga e durabilidade.

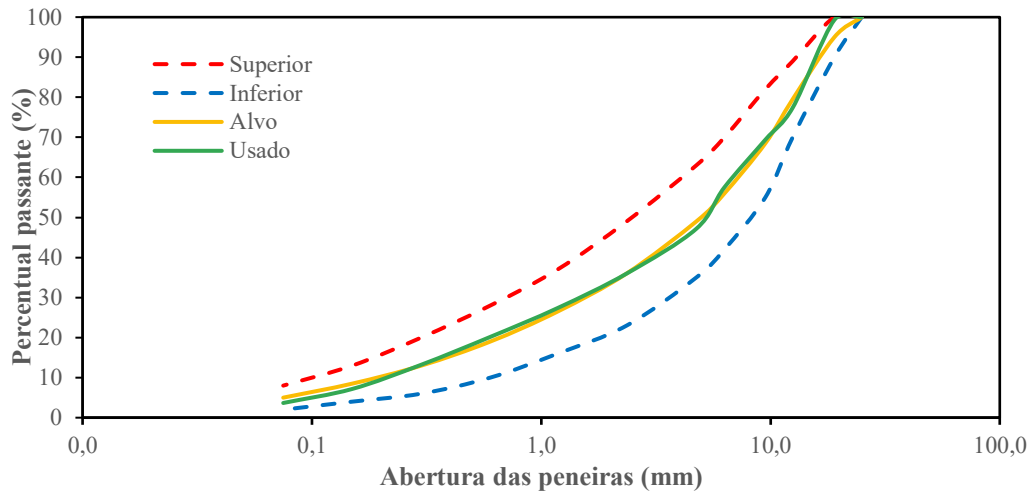
Do ponto de vista ambiental, a adoção de misturas enquadradas na Faixa B ou em outras faixas normatizadas aumenta a confiabilidade das análises de ciclo, uma vez que essas especificações refletem as condições e materiais de referência utilizados nas rodovias brasileiras, garantindo maior consistência aos resultados.

3.3 *Ensaios laboratoriais*

O ensaio inicial realizado foi o de granulometria (DNIT 412/2019 – ME), cujo objetivo é determinar a distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados empregados em misturas asfálticas. O procedimento consiste no peneiramento da amostra seca em conjunto de peneiras padronizadas, quantificando-se a massa retida em cada malha para calcular as

porcentagens retidas e passantes. Consiste em um ensaio primário e fundamental para o controle de qualidade e para garantir a adequação dos agregados ao projeto de pavimentação. Dessa forma, foi elaborado o Gráfico 1 a fim de representar a curva granulométrica da mistura asfáltica.

Gráfico 1– Faixa granulométrica utilizada nas misturas asfálticas (DNIT 031/2024)



Fonte: elaborado pelo autor. (2025).

Posteriormente, foi separada a proporção dos materiais brita 3/4”, brita 3/8” e pó de pedra, conforme Tabela 1, para a dosagem da MREF. Nessa etapa, os corpos de prova (CPs) para compactação foram separados com, em média, 1.200 g (DNIT 178/2018 – PRO) por teor de LA convencional (CAP 50/70), sendo quatro teores analisados escolhidos com base em experiências anteriores do CT-Asfalto/UFC com agregados e ligantes locais (4,0, 4,5, 5,0 e 5,5%), e para a obtenção densidade máxima teórica da mistura asfáltica (Gmm), foram feitos 2 CPs com 1.500 g (DNIT 427/2020 – ME) por teor de LA convencional com os mesmos teores, em concordância com a Tabela 2.

Tabela 1– Proporção de material para dosagem de mistura asfáltica

Proporção material (<i>Solver</i>)			
3/4”	3/8”	Pó de pedra	Total
0,34	0,24	0,42	1,00

Fonte: elaborado pelo autor. (2025).

Enfatiza-se que o ensaio de determinação da densidade relativa máxima medida (Gmm) e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas consiste em um procedimento técnico utilizando o método Rice, isto é, mede-se, em laboratório, a massa da mistura solta (agregados + ligante) e determinar o volume real que essa massa ocupa, geralmente por meio de pesagem hidrostática em picnômetro sob vácuo ou outro procedimento de imersão. Com esses dados é calculada a Gmm, que substitui a tradicional densidade máxima

teórica (DMT), calculada anteriormente pela média ponderada das densidades específicas dos componentes. A G_{mm} tende a ser igual ou menor do que a DMT, dependendo da absorção dos agregados.

A determinação da densidade relativa máxima medida é adimensional e dada conforme Equação 4.1:

$$G_{mm} = \frac{A}{A+B-C} \quad (4.1)$$

Onde: A é a massa da amostra seca ao ar, expressa em gramas (g); B é a massa do recipiente com volume completo com água (g) e C é a massa do recipiente (cilindro) contendo a amostra submersa em água, expressa em gramas (g).

Ainda no contexto do DNIT 427/2020 – ME, a densidade relativa máxima medida (G_{mm}) representa a densidade da mistura asfáltica na condição em que todos os vazios são eliminados, ou seja, corresponde ao estado hipotético em que os espaços entre partículas estão completamente preenchidos pelo ligante, determinando-se o volume real ocupado pela mistura solta sob vácuo. Por conseguinte, a massa específica máxima medida (ME_{m_m}), por sua vez, expressa a densidade física da mistura não compactada em termos absolutos (massa por volume), derivada a partir da relação entre massa e volume medidos. Esses dois parâmetros são fundamentais para fornecer o valor de referência para a dosagem, compactação, enquanto permite calcular o volume de vazios, o teor de ligante efetivo, a densidade real de um pavimento projetado ou a ser compactado e avaliar a trabalhabilidade.

A G_{mm} foi obtida através do método de ensaio e utilizada para obter o volume de vazios das amostras quando comparada com a ME_{m_m} pela Fórmula 4.2. A Fórmula 4.3 descreve o procedimento para o cálculo do Volume de vazios (V_v).

$$ME_{m_m} = \frac{P_{seco}}{G_{Psaturado} - P_{submerso}} \times 0,9971 \quad (4.2)$$

$$V_v = \frac{G_{mm} - ME_{m_m}}{G_{mm}} = \left(1 - \frac{ME_{m_m}}{G_{mm}}\right) \quad (4.3)$$

Ressalta-se que a constante 0,9971 refere-se à massa específica da água a 25 °C, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³). Caso o ensaio seja realizado em outras temperaturas, utilizar a massa específica da água correspondente a esta temperatura.

A fim de ilustrar os cálculos realizados, foi elaborada a Tabela 2.

Tabela 2 – Densidade relativa máxima medida da mistura não compactada por teor de ligante

4,00%		
Gmm1	Gmm2	Média
2,497	2,496	2,496
4,50%		
Gmm1	Gmm2	Média
2,476	2,478	2,477
5,00%		
Gmm1	Gmm2	Média
2,455	2,451	2,453
5,50%		
Gmm1	Gmm2	Média
2,435	2,44	2,437

Fonte: elaborado pelo autor. (2025).

É importante salientar que, antes de iniciar os ensaios de compactação e de determinação da Gmm, foi realizado o procedimento de determinação da Viscosidade Brookfield (viscosidade rotacional), com auxílio de um viscosímetro rotacional modelo DVII+, acoplado a um controlador de temperatura THERMOSEL, conforme diretrizes da norma ASTM D4402/D4402M-23, cuja função consiste em medir a força necessária para girar um cilindro dentro do fluido a uma velocidade constante. Esse ensaio é uma etapa importante para conseguir estabelecer a curva de viscosidade, e, com ela, encontrar a faixa de temperatura de usinagem e compactação, sendo, respectivamente, a temperatura que o ligante precisa estar quando for misturado com o material granular e a temperatura necessária para moldar os corpos de prova. Por norma, são definidas três temperaturas de ensaio, são elas: 135, 150 e 177 °C conforme ABNT NBR 15.184/2021.

O controle da temperatura é fundamental tanto na usinagem quanto na compactação, atuando como um parâmetro crítico que norteia as propriedades mecânicas e a integridade dimensional do material processado.

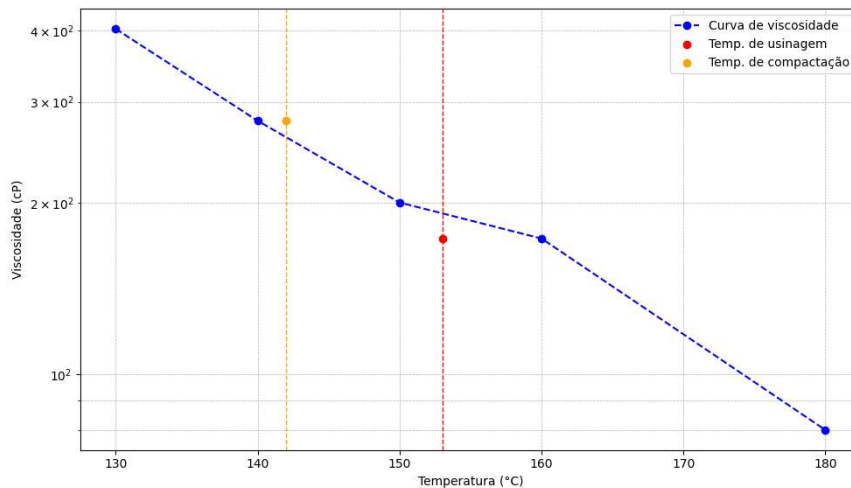
No processo de produção em usina, a temperatura de mistura é o principal fator que condiciona a trabalhabilidade da massa e a preservação das propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado. O calor excessivo durante a mistura pode induzir ao envelhecimento precoce do bioaditivo por oxidação térmica, comprometendo a estabilidade da mistura asfáltica. Além disso, variações térmicas inadequadas durante a moldagem dos CPs em laboratório afetam diretamente o índice de vazios e a compactação, resultando em distorções nos parâmetros volumétricos requeridos pelas normas vigentes.

Na compactação, a temperatura é o fator que dita a viscosidade do ligante. A compactação deve ocorrer dentro de uma faixa ótima de temperatura, correlacionada com uma

viscosidade específica que permite o rearranjo eficiente dos agregados e a redução dos vazios. Temperaturas abaixo do ótimo resultam em viscosidade elevada, ou seja, inibindo a mobilidade das partículas e levando a uma densidade insuficiente (alta porosidade). A densidade inadequada compromete a rigidez estrutural, a resistência à fadiga e a durabilidade do material final contra a penetração de água e à deformação permanente.

Em síntese, o controle preciso da temperatura é um requisito fundamental para otimizar a eficiência energética do processo, a vida útil dos equipamentos e garantir que o produto final atinja as especificações de desempenho e durabilidade exigidas. A fim de ilustrar isso foi elaborada a Figura 2.

Figura 2 - Determinação da TU e TC a partir da curva de viscosidade



Fonte: elaborado pelo autor. (2025)

Após a realização do ensaio, encontrou-se para a TU = 155 °C e para TC = 143 °C. Inicialmente, foi realizado testes com a mistura de referência (MREF) no laboratório, acompanhando um profissional adequado e com autorização para manuseio do material. Depois de produzida a mistura asfáltica, prosseguiu-se com a compactação manual dos CPs para teste, devido à problemática com o compactador mecânico que o laboratório possui, e utilizando as temperaturas determinadas, a fim de determinar o teor em (%) de CAP 50/70 adequado para atender o teor ótimo em que o Vv é 4,0%.

Dessa forma, foram feitos 3 testes para cada teor e analisado a média de Vv, com margem de $\pm 0,5\%$. A determinação gráfica da relação entre volume de vazios na mistura x teor de ligante, é um parâmetro volumétrico fundamental na dosagem de misturas asfálticas, visto que auxilia na determinação da proporção de agregados e ligante asfáltico.

As características dos ligantes e agregados utilizados nas misturas podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Características dos ligantes e agregados utilizados

Ligante asfáltico puro	
Ensaio	MREF
Ponto de amolecimento (°C)	49
Brookfield 135 °C visco. (cP)	345
Faixa de Usinagem (°C)	151,5 - 158
Faixa de Compactação (°C)	140,4 - 145
Agregados	
Ensaio	MREF
Abrasão Los Angeles (%)	34
Massa específica (g/cm ³)	2,396

Fonte: elaborado pelo autor. (2025)

Desse modo, após realização da pesagem de CPs secos, submersos e saturados, as tabelas e cálculos utilizados nesta etapa foram elaborados no *Microsoft Excel*. O teor de ligante encontrado foi de 5.5% para que se alcançasse o parâmetro volumétrico desejado. Posteriormente, foi replicado mais três CPs com a mesma proporção de material e com o teor encontrado, a fim de verificar se estava coerente para a interação de agregados e ligante asfáltico utilizado, portanto, observou-se que o teor estava concordante com o volume de vazios (Vv).

Em prosseguimento, iniciou-se os ensaios planejados para a elaboração do projeto. Foram utilizados 3 CPs para ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (DNIT 136/2018 – ME), 5 CPs para ensaios de Módulo de Resiliência (135/2018 – ME), 15 CPs Fadiga por Compressão Diametral à tensão controlada (DNIT 183/2018 – ME) e 3 CPs como teste a fim de determinar a quantidade de giros necessários para que a mistura adquirisse um Vv de 7.0% a partir do ensaio de Dano por Umidade Induzida (DNIT 180/2018 – ME).

Diante do que foi apresentado, para cumprir o escopo do projeto foram realizadas todas as etapas anteriores de ensaios também para a mistura modificada (MM). Isto é, desde a realização do ensaio de Viscosidade de Brookfield até o ensaio de DUI, objetivando analisar os parâmetros da mistura quando seu ligante asfáltico puro possui uma adição de 2% de LCCA. Nesse viés, os resultados da viscosidade rotacional para a MREF e MM LCCA-2% é interessante observar que a viscosidade da mistura modificada foi ligeiramente inferior comparando as duas amostras do estudo.

Ademais, salienta-se que o aumento na temperatura resulta na diminuição na viscosidade de todos os ligantes asfálticos. Devido a essa tendência de fluidez em altas temperaturas e à redução da viscosidade, os bioaditivos proporcionaram um efeito de lubrificação que pode melhorar a trabalhabilidade do ligante asfáltico, como mencionado por (UCHOA *et al.*, 2021). A Figura 3 corresponde a uma amostra do LCCA produzida no laboratório de ligantes asfálticos após processos de síntese que envolve uma série de reações

químicas, purificação, lavagem e secagem até chegar no produto final.

Figura 3 - Síntese do Líquido da Casca da Castanha de Caju Acrilado (LCCA)



Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

Somado a isso, para o ligante asfáltico modificado a TUC obtida foram, TC = 140 °C e TU = 153 °C. A incorporação do biomodificador possibilitou a diminuição das temperaturas de usinagem e compactação. Ilustrando os resultados, obteve-se para o ligante asfáltico modificado os seguintes valores da Tabela 4:

Tabela 4 - Características do ligante modificado utilizado

Ligante asfáltico modificado LA-LCCA-2%	
Ensaio	MM
Ponto de amolecimento (°C)	50
Brookfield 135 °C visco. (cP)	350
Faixa de Usinagem (°C)	152 – 156
Faixa de Compactação (°C)	139 – 142

Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

3.4 Metodologia

3.4.1 Resistência à tração por compressão diametral

O Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) é um procedimento padronizado, regido pela Norma DNIT 136/2018 – ME, que tem importância fundamental na avaliação do desempenho de misturas asfálticas. Este ensaio é realizado em CPs cilíndricos compactados da mistura asfáltica. O método consiste em aplicar uma carga de compressão uniformemente distribuída ao longo de um plano diametral do CP. Essa carga de

compressão, aplicada em uma taxa constante (normalmente 50,8 mm/min), induz uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga, causando a ruptura do CP. A Figura 4 ilustra a realização em laboratório com o CP no dispositivo denominado molde para tração indireta na prensa Marshall/CBR automatizada, determinando com precisão tanto a estabilidade quanto à fluência.

O valor máximo da carga suportada antes da ruptura é registrado e utilizado no cálculo da Resistência à Tração (RT), dada pela seguinte expressão dada pela Fórmula 4.5:

$$Rt = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times D} \quad (4.5)$$

Onde: (Rt) é a Resistência à tração por compressão diametral (Mpa); P é a carga máxima aplicada (N); h é a altura do corpo de prova (mm); D é o diâmetro do corpo de prova (mm).

Figura 4 - Ensaio de Resistência à Tração na Prensa Marshall 30kN



Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

O procedimento auxilia na avaliação da Coesão da Mistura, visto que o RT é um indicador direto da coesão interna e da resistência da matriz asfáltica à fratura. Valores mais altos de RT sugerem que a mistura é mais resistente ao estiramento e, conseqüentemente, menos suscetível à fissuração causada pelo tráfego ou por variações térmicas. No estudo, a comparação dos valores de RT das misturas com e sem LCCA-2% permite quantificar o impacto do bioaditivo na aderência entre o ligante e o agregado. Se o modificador melhorar a interface, a RT deve aumentar ou, pelo menos, manter-se no mesmo patamar de desempenho da mistura de referência, justificando a viabilidade técnica do aditivo.

3.4.2 Módulo de Resiliência

O Ensaio de Módulo de Resiliência (MR), normatizado pela DNIT 181/2018 – ME, configura-se como um dos ensaios de desempenho mais importantes para a caracterização mecanicista de misturas asfálticas. Ele foi realizado no equipamento para ensaios dinâmicos RiO, a partir de um sistema compacto de testes dinâmicos de 25/30 kN (carga dinâmica/estática) para a execução de ensaios de rigidez em amostras de asfalto. O equipamento possui uma estrutura rígida com quatro colunas e atuador servo hidráulico com medição interna do deslocamento e célula de carga de alta precisão para utilização em câmaras climáticas. Em síntese, o MR mede a rigidez elástica da mistura sob condições de carregamento dinâmico. Nesse sentido, aplica-se pulsos de cargas cíclicas de curta duração no CPs, utilizando o método de compressão diametral, porém comparando ao RT, o carregamento é diferente. O MR define a relação entre a tensão cíclica aplicada e a deformação elástica recuperável que o material sofre, visto que simula a passagem de veículos, isto é, um carregamento rápido e repetitivo. O cálculo do MR é baseado na medição da deformação horizontal recuperável do CP, possuindo como expressão a Equação 4.6:

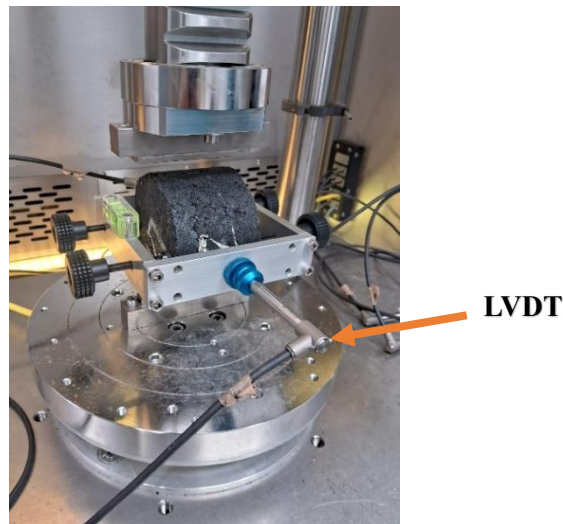
$$MR = \frac{P \times (\nu + 0.27)}{h \times \Delta H} \quad (4.6)$$

Onde: (MR) é o Módulo de Resiliência (Mpa); P é a carga aplicada (N); ν é o coeficiente de Poisson (0.35 para MA); h é a espessura do CP (mm) e ΔH é a deformação horizontal recuperável (mm).

Nesse viés, o MR consiste no principal parâmetro de rigidez utilizado em métodos de dimensionamento de pavimentos (como o Método de Designação de Pavimentos do DNIT e o método AASHTO), sendo fundamental para prever a capacidade estrutural bem como a distribuição de tensões na camada de concreto asfáltico. Ademais, a incorporação do LCCA ao ligante pode alterar as propriedades viscoelásticas do LA. O ensaio de MR permite quantificar com precisão se o bioaditivo aumenta, diminui ou mantém a rigidez da mistura asfáltica, convém enfatizar que uma rigidez excessiva pode levar à fissuração por fadiga, embora seja realizado o ensaio para fadiga separadamente, enquanto uma rigidez adequada é essencial para resistir às deformações permanentes (trincas). Em suma, o ensaio de MR fornece dados quantitativos essenciais sobre a contribuição estrutural da sua mistura asfáltica modificada frente à convencional, ajudando na avaliação de desempenho do LCCA no ligante. Sua

execução está ilustra na Figura 5.

Figura 5 - Ensaio de Módulo de Resiliência na RiO 30 kN/30 Hz



Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

3.4.3 *Dano por Umidade Induzida*

O Ensaio de Dano por Umidade Induzida (DUI), embora utilize uma parte da DNIT 136/2018 – ME (Resistência à Tração - R_t) para seu cálculo, é uma metodologia crucial para avaliar a durabilidade da mistura asfáltica e é regida pela DNIT 180/2018 – ME. Em síntese, analisa-se a suscetibilidade das misturas asfálticas à perda de resistência mecânica causada pela ação combinada da água e do tráfego, quantificando o potencial de deslocamento entre o LA e o agregado mineral, levando à perda de resistência e falha prematura do pavimento.

O andamento desse método envolve o preparo de dois grupos de CPs idênticos em compactação com um $V_v = 7.0\%$, conforme informado no item 4.3 do trabalho vigente, para simular condições de maior permeabilidade. Nesse sentido, os grupos são divididos em dois tipos: condicionado e não condicionado. No primeiro, os CPs são submetidos a um processo rigoroso que simula o envelhecimento e a ação da água, incluindo: saturação com água; ciclo de congelamento e imersão em banho maria (água quente) no equipamento Banho Maria para Amostras Marshall. Para o segundo, os CPs são mantidos em temperatura controlada, para o estudo, os CPs foram colocados na prensa Universal Testing Machine (UTM) 30 no LMP. Após o condicionamento, a Resistência à Tração (R_t) é determinada para os dois grupos (seco e condicionado) utilizando a compressão diametral.

Dessa forma, resultado final do (DUI) é o Índice de Retenção de Resistência (IRR), também conhecido como Razão de Resistência à Tração (RRT) ou (TSR), calculado pela

seguinte relação:

$$RRT = \frac{Rt_{condicionada}}{Rt_{seca}} \times 100$$

O ensaio de DUI auxilia a indicar o desempenho ligado diretamente à durabilidade e à escolha do aditivo, isso porque ele avalia a adesividade da amostra de asfalto, isto é, o RRT demonstra a capacidade de adesão ou, em outras palavras, a relação entre ligante asfáltico (com e sem aditivo modificador) ao agregado, mesmo sob as condições mais severas de saturação e temperatura, bem como a coesão da mistura em condições resultantes de saturação e condicionamento acelerado em presença de água conforme ilustrado na Figura 6. Valores de RRT abaixo do limite mínimo, em média 70%, indicam que a mistura estar suscetível ao dano por umidade. Para o estudo foram realizados testes para atingir o volume de vazios adequado e definidos respectivamente para a MREF e MM: 20 giros e 40 giros. Assim, o LCCA, sendo um material de origem orgânica, pode afetar a interface asfalto-agregado. O método, portanto, permite verificar se o LCCA atua como um agente *anti-stripping* (anti-desgaste) ou se ele compromete a ligação em presença de água.

Figura 6 - Corpo de prova condicionado no ensaio de DUI



Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

Por fim, a falha por umidade é uma das causas primárias da degradação de pavimentos. Ao comprovar um alto RRT, pode-se fornecer uma evidência técnica de que a mistura asfáltica modificada tenha maior longevidade e exigiria menor manutenção sob condições de umidade, cumprindo um requisito essencial de desempenho para aplicação em campo, verificando se a amostra de asfalto é durável e resistente aos efeitos da água.

3.4.4 Fadiga por compressão diametral (CD)

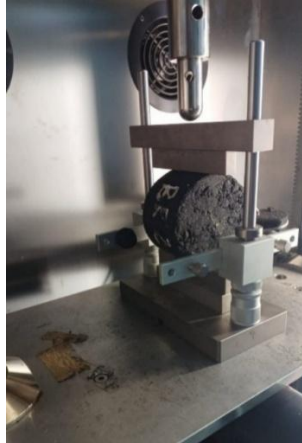
O Ensaio de Fadiga CD avalia a vida útil em serviço da mistura asfáltica sob carregamento repetitivo. Embora existam várias configurações (como a tração-compressão em quatro pontos), a adaptação do ensaio de compressão diametral (utilizando pulsos cíclicos de carga, similar ao MR) configura-se como um método amplamente utilizado para determinar a resistência à fadiga em laboratório, conforme apresentado na Figura 7. É importante notar que a Norma DNIT específica para Fadiga pode variar ou utilizar métodos mais avançados, mas o princípio de dano acumulado permanece o mesmo.

Dito isso, o ensaio de Fadiga simula o dano estrutural causado pela repetição de ciclos de carga provenientes do tráfego. O escopo é determinar quantos ciclos a mistura asfáltica consegue suportar até que sua rigidez caia para um valor crítico, geralmente, um valor crítico de 40% do valor inicial, indicando a falha por fadiga. Ademais, o ensaio é realizado sob condições controladas de temperatura para simular as condições de serviço; tensão ou deformação controlada, mantendo-se a amplitude da tensão (força) ou da deformação constante ao longo dos ciclos e com os CPs compactados a 5.0% de V_v , sendo uma condição intermediária que representa a estrutura do pavimento após alguns anos de serviço.

A Vida de Fadiga (N_f) é, em suma, o número total de ciclos de carregamento que a amostra de asfalto suporta até o critério de falha ser atingido. Os resultados de N_f sob diferentes níveis de tensão ou deformação são plotados em um gráfico, gerando a Curva de Fadiga, que serve como um modelo preditivo da durabilidade do pavimento e contra a propagação de fissuras por tráfego. Um bom desempenho à fadiga demonstra que o pavimento terá uma vida útil prolongada, exigindo menos intervenções de manutenção, por exemplo. A incorporação do LCCA altera a viscoelasticidade do ligante, para isso o ensaio permite verificar se essa modificação torna o material mais frágil e suscetível à fissuração prematura (baixa N_f) ou se está contribuindo para uma maior flexibilidade e capacidade de dissipar energia sob carregamento cíclico (alta N_f).

Todavia, embora o Módulo de Resiliência meça a rigidez elástica inicial, o ensaio de Fadiga avalia o acúmulo de dano ao longo do tempo, ou seja, os dois ensaios são complementares, pois fornecem uma caracterização completa do comportamento elástico e da durabilidade da amostra de asfalto estudada.

Figura 7 - Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral na UTM-30



Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

3.4.5 Método de dimensionamento mecânico-empírico

Ele é utilizado para prever a vida útil e o desempenho do pavimento com base nas propriedades reais dos materiais e nas condições de tráfego e clima. Nesse contexto, o método opera em duas fases principais, são elas: Mecanicista, cuja fase utiliza as propriedades fundamentais dos materiais MR dos CPs e o Módulo de Elasticidade em conjunto com modelos de elementos finitos ou teoria da elasticidade para calcular as tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos da estrutura do pavimento sob o efeito de uma carga padrão. Em contrapartida, na Empírica tem-se que os resultados mecânicos calculados são inseridos em equações empíricas de desempenho (modelos de transferência), calibradas a partir da observação de pavimentos reais ao longo do tempo. Essas equações traduzem as respostas mecânicas em variáveis de falha comuns, como a Vida de Fadiga (N_f) e a Deformação Permanente (Afundamento de Trilha de Roda).

Sob essa óptica, o software MeDiNa, isto é, consiste numa ferramenta computacional desenvolvida para implementar a metodologia de dimensionamento de pavimentos pelo método mecânico-empírico, adaptado e calibrado para condições de tráfego, adotando um N anual (1° ano) = 1×10^6 pro início da vida do pavimento, considerado um tráfego médio e materiais brasileiros. O MeDiNa utiliza o MR como dado de entrada fundamental para caracterizar a rigidez da camada de concreto asfáltico, além do valor de RT, valor de Gmm, faixa granulométrica adotada, valor de teor de asfalto (%), valor de volume de vazios (%) e os dois fatores de fadiga, os coeficientes de regressão (k_1) e (k_2) obtidos no ensaio de Fadiga, permitindo transferir as propriedades do seu material para o contexto de um projeto estrutural real.

Outrossim, o *software* também incorpora modelos de transferência empíricos que

preveem falhas estruturais do pavimento citados nesse trabalho: Fadiga (trincamento), calculando a vida útil do pavimento antes do trincamento, utilizando as tensões e deformações geradas pelo carregamento e a Deformação Permanente (Trilha de Roda), prevendo o acúmulo de deformação plástica nas camadas. Ao simular o desempenho da sua mistura asfáltica com modificador no ligante asfáltico puro dentro do MeDiNa e compará-lo com o desempenho de uma mistura convencional, é possível quantificar o benefício ou o custo estrutural de incorporar o bioaditivo, demonstrando se a mistura modificada permite a redução da espessura da camada ou o aumento da vida útil. Em suma, a ferramenta de dimensionamento é a ponte que liga seus resultados de laboratório (MR e a potencial vida de Fadiga) com a realidade do dimensionamento de pavimentos, o ganho ou perda de desempenho mecânico e embasando o estudo, precedendo a sua aplicação em campo. A versão utilizada para estudo é a “v.2.0.0” atualizada em outubro de 2025 com o objetivo de avaliar a evolução da área trincada no software das duas amostras do estudo.

É importante denotar também as características das camadas granulares e do subleito utilizados na simulação, visto que para fins comparativos da evolução da área trincada, o que diverge será apenas a camada de revestimento, pois possui propriedades e resultados de ensaios diferentes. Nesse sentido, para a comparação fazer sentido foram adotados para as duas misturas, material granular, solo argiloso e subleito iguais. Na camada de material granular o tipo escolhido foi Brita Graduada – Gnaisse C3 com 20 cm de espessura e $\nu = 0,35$, na camada de solo fino, siltoso ou argiloso no software, foi adotado Solo Argiloso LG'(1) com o mesmo valor de espessura e $\nu = 0,45$, por fim, para o subleito, foi adotado Solo Siltoso NS' com $\nu = 0,45$. Ademais, a estrutura do pavimento utiliza dois solos distintos abaixo da base granular: um solo fino de comportamento laterítico (Solo Argiloso LG' – MR 250 MPa) e um solo de comportamento não laterítico (Solo Siltoso NS' – MR 189 MPa), ambos possuem valor de MR e coeficiente de deformação permanente ψ distintos. Um ponto crucial na mecânica dos pavimentos é como a rigidez da camada superior protege as camadas inferiores e qual das amostras estudadas, por exemplo, resultaria em um aumento das tensões transmitidas para as camadas granulares e para os solos, isso pode explicar por que todas as camadas inferiores deformaram mais ou menos nos dois cenários.

Adicionalmente, cabe também explicar sobre os coeficientes de deformação permanente. Eles descrevem o comportamento do material sob a repetição de cargas de tráfego. As três camadas possuem 4 coeficientes de regressão, que também podem ser representados dessa forma: k_1 , k_2 , k_3 e k_4 . Em suma, o ψ_1 consistem em um coeficiente de ajuste, isto é,

uma constante de proporcionalidade que se relaciona com as características do material e às condições de ensaio; ψ_2 é a influência da tensão de confinamento, ou seja, ele indica como a pressão lateral que tem por função “segurar” o material ajuda a reduzir essas deformações, cujo valores negativos explicam que existe uma relação inversamente proporcional entre o confinamento e o afundamento da camada; ψ_3 é a influência da tensão desviadora, representa a sensibilidade do material à carga vertical aplicada pelo pneu, pode-se inferir que a carga vertical direta é proporcional ao aumento da deformação e, por fim, ψ_4 é a taxa de acúmulo com o tráfego, esse psi define a velocidade com que o material deforma conforme o número de passagens de veículos aumenta (N). Nesse sentido, a análise da estabilidade estrutural do pavimento frente ao acúmulo de deformações plásticas nas camadas granulares e de solo foi realizada através do modelo de pavimentação mecanístico-empírico presente no *software*. Este modelo utiliza a equação fundamental 4.7:

$$\varepsilon_p = \psi_1 \times (\sigma_3^{\psi_2}) \times (\sigma_d^{\psi_3}) \times (N^{\psi_4}) \quad (4.7)$$

Resumidamente, esses valores são obtidos através de ensaios de Triaxial de Cargas Repetidas, os coeficientes são as "impressões digitais" mecânicas do material. Diferente do método antigo (CBR), que se configura como um índice de resistência, esses coeficientes de deformação permitem que o MeDiNa preveja exatamente quantos milímetros de afundamento (ATR) a camada de Brita Graduada, por exemplo, terá após 10 anos de uso. A Figura 8 ilustra as camadas adotadas para os dois cenários de misturas.

Figura 8 - Sub camadas e subleito utilizados na simulação das misturas

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaíse C3	20,0	265	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: *Software* MeDiNa. (2025)

Por fim, realizou-se a utilização das funções de dimensionamento (F2), cuja função consiste no simulador sugerir ou verificar a espessura para satisfazer critérios e avaliação (F3) na simulação, cuja função consiste em fixar a estrutura e solicitar ao software apenas prever o dano (AT% e ATR). Inicialmente, a estrutura de referência foi dimensionada (F2) para estabelecer a seção típica de projeto. Posteriormente, utilizou-se a função de avaliação (F3) para a mistura modificada, fixando-se rigorosamente as mesmas camadas e espessuras da seção de referência, cuja estratégia metodológica visou isolar a variável geométrica, garantindo que a comparação do desempenho estrutural, especificamente a evolução da Área Trincada (AT%),

fosse influenciada exclusivamente pelas propriedades mecânicas intrínsecas do novo revestimento. Assim, assegurou-se a isonomia dos parâmetros de entrada, permitindo validar a eficácia do bioaditivo de forma comparativa e tecnicamente fundamentada. Importante destacar que também foi realizada o dimensionamento F2 para a mistura modificada para analisá-la individualmente.

3.4.6 Vantagens e fundamentação do potencial sustentável do bioaditivo

A seleção do LCCA como agente modificador do ligante asfáltico fundamentou-se na busca por uma solução que aliasse desempenho mecânico superior a benefícios ambientais e socioeconômicos. A utilização deste material na presente metodologia justifica-se pelos seguintes critérios:

- **Sustentabilidade e reaproveitamento:** O LCC é um derivado renovável proveniente de subprodutos da agroindústria do estado do Ceará. Sua escolha visa testar a viabilidade de substituição de aditivos poliméricos sintéticos (derivados de petróleo) por uma alternativa de base biológica e regional.
- **Eficiência Térmica e redução de emissões:** O bioaditivo também foi selecionado para atuar na redução das Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUC). Metodologicamente, este controle é essencial para avaliar a diminuição do consumo energético no processo de produção e a consequente redução da volatilização de compostos orgânicos (fumos asfálticos), melhorando a segurança ocupacional e reduzindo a pegada de carbono.
- **Aprimoramento estrutural:** Do ponto de vista do comportamento mecânico, a incorporação do LCCA objetiva a modificação reológica do ligante para elevar a resistência da mistura ao acúmulo de danos. A metodologia foca na análise da vida útil e no enquadramento em classes de fadiga, visando a obtenção de um pavimento com maior durabilidade, o que, conseqüentemente, reduz a necessidade de intervenções de manutenção e otimiza os custos do ciclo de vida da infraestrutura.

É importante ressaltar que ao longo da cadeia produtiva (como o consumo energético na produção ou o transporte), é imprescindível a otimização de processos. Assim, a inclusão dessa análise auxilia no nível técnico do trabalho, alinhando-o às tendências de engenharia de baixo carbono e podendo promover a viabilidade ambiental, além da mecânica, da solução alternativa. Para isso, é necessário informações como: teor de emissão de dióxido

de carbono e energia embutida presente na compactação da mistura asfáltica.

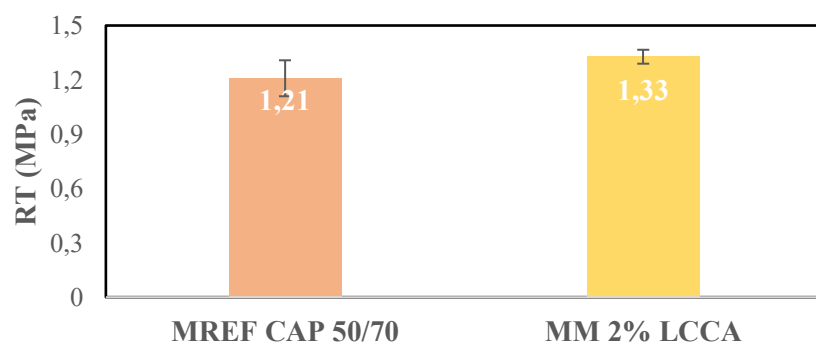
Ao integrar a valorização do resíduo agroindustrial cearense com o ganho de desempenho mecânico e a mitigação de impactos ambientais, este estudo propõe um modelo de pavimentação que não apenas atende aos rigorosos critérios de durabilidade do sistema MeDiNa, mas também promove uma engenharia mais consciente e eficiente. Portanto, a análise a seguir detalha os procedimentos experimentais que validam o potencial deste bioaditivo em elevar o patamar de qualidade e sustentabilidade das misturas asfálticas modernas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A caracterização física e reológica dos ligantes asfálticos evidenciou que a adição do bioaditivo derivado do LCCA promoveu uma redução significativa na viscosidade em todas as temperaturas avaliadas, com destaque para 135 e 150 °C. Essa diminuição na viscosidade é um indicador direto de ganho na trabalhabilidade, permitindo que o ligante envolva os agregados de forma mais eficiente durante a mistura, conforme verificado por Rodrigues et. al (2010), que também indicou que a presença do LCC promoveu uma redução na viscosidade do ligante asfáltico CAP 50/70. Por consequência, isso possibilita a redução das temperaturas de usinagem e compactação, minimizando não apenas o consumo energético e emissões, como também mitiga o envelhecimento precoce do ligante por oxidação durante a execução do pavimento.

Os ensaios de RT por compressão diametral demonstraram um aumento médio de 10% na resistência para a mistura asfáltica modificada com 2% de LCCA em relação à mistura de referência (MREF), comportamento que sugere um incremento na coesão da interface agregado-ligante proporcionado pelo LCCA. Os resultados de RT indicaram um ganho relativo de 10% na MM em relação à MREF, sugerindo maior coesão na interface agregado-ligante. Nota-se, também que houve um aumento de 32,8% observado no MR. Essa divergência indica que, enquanto o bioaditivo eleva significativamente a rigidez elástica, a resistência máxima à ruptura permanece limitada por fatores como a natureza mineral do agregado gnáissico ou o rearranjo granulométrico das partículas (Souza, 2016). Essa observação converge com estudos anteriores que indicam que a eficiência de aditivos derivados do LCC na matriz asfáltica é condicionada pela compatibilidade físico-química com o esqueleto mineral utilizado. Além disso, a mistura asfáltica de referência apresentou, em média, valor de RT de 1,21 MPa, enquanto a mistura asfáltica modificada apresentou valor de RT de 1,33 MPa (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Resultados dos ensaios de RT para as duas misturas asfálticas



Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

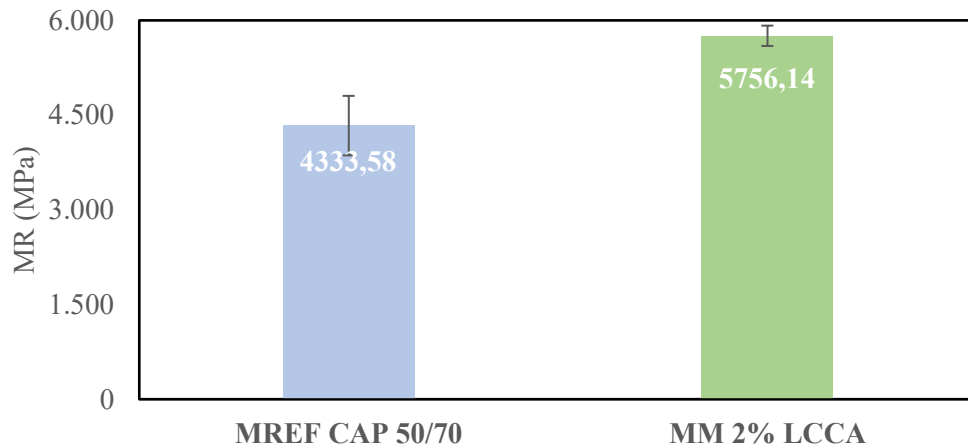
A resistência à tração é um parâmetro amplamente utilizado para avaliar a coesão interna e o desempenho mecânico de misturas asfálticas (Bahia *et al.*, 2002). Notou-se que a mistura com LCCA apresentou menor desvio padrão em comparação à MREF, o que sugere maior homogeneidade dos corpos de prova e maior repetibilidade dos resultados experimentais. A diferença observada entre as médias de RT das duas misturas pode reforçar seu potencial de aplicação como modificador do ligante convencional. A divergência entre os valores de RT para as duas misturas é um indicativo da alteração, mesmo que baixa, da coesão interna e da resistência à ruptura do material. Embora o RT seja um ensaio de ruptura monotônica, ele atua como um parâmetro de referência: misturas com RT elevado tendem a apresentar um melhor desempenho inicial frente a tensões de tração na fibra inferior da camada de revestimento.

Contudo, a resistência ao trincamento ao longo do tempo deve ser validada pelos resultados do ensaio de fadiga, que simula o carregamento dinâmico repetitivo e a progressão da microfissuração. Ademais, apesar da diferença numérica absoluta seja de 0,12 MPa, a partir da comparação dos cenários foi realizado o Teste t de *Student* com obtenção de (valor-p = 0,1626). Essa análise se configura como uma ferramenta estatística utilizada para determinar se existe uma diferença significativa entre as médias de dois grupos e determinar se a diferença entre elas é estatisticamente considerável, semelhante ao ANOVA. Todavia, uma vez que $p > 0,05$, foi concluído a partir das médias de RT das duas misturas, que tal variação não possui significância estatística nesse ensaio especificamente.

No ensaio de MR foi observado um comportamento mais elástico e estável na mistura com 2% de LCCA, que atuou como um agente de enrijecimento, modificando as propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico base, resultando em uma mistura mais rígida à temperatura de 25°C e frequência de 1 Hz. No que diz respeito ao dimensionamento estrutural, uma maior rigidez pode ser benéfica para a resistência à deformação permanente (afundamento em trilha de roda, ATR), que ocorre tipicamente em altas temperaturas, cujo maior valor de MR sugere que a mistura modificada terá um melhor desempenho contra o ATR em climas quentes, podendo ser visual na simulação no MeDiNa. Além disso, também indica a capacidade de recuperação mais eficiente frente a cargas repetidas. O MR médio para a mistura de referência foi de aproximadamente 4.333 MPa, enquanto a mistura modificada atingiu 5.756 MPa, evidenciando um ganho de rigidez, conforme também verificado por (Ribeiro, 2011), cujo projeto também apresentou propriedades físico-químicas do LCC que são potencialmente úteis para conferir ao CAP maior adesão com os agregados. O Gráfico 3 apresenta todos os valores obtidos em ensaio laboratorial na prensa hidráulica RiO conforme informado no item 3.4.2

deste trabalho, possuindo intervalos de ciclos de carregamento para rigidez.

Gráfico 3 - Resultados dos ensaios de MR para as duas misturas asfálticas



Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

Além disso, os ensaios de MR foram submetidos a uma análise estatística via linguagem *Python* para verificar a consistência dos resultados laboratoriais. A avaliação baseou-se no cálculo do Coeficiente de Variação (CV) para cada CP, conforme os critérios de repetibilidade estabelecidos pelas normas técnicas vigentes. Como observado na Tabela 5, todos os ciclos de carga apresentaram dispersão controlada, com valores de CV situados abaixo do limite normativo de 10%, validando a precisão dos dados obtidos para as simulações subsequentes.

Tabela 5 - Análise estatística os valores de MR por linguagem Python

Ciclo de carga 61-65	Ciclo de carga 76-80	Ciclo de carga 91-95	Média de MR	Desvio Padrão	CV (%)	Coerên cia
4793,47	4680,89	4415,60	4629,99	194,01	3,42	OK
4757,21	4520,03	4463,45	4580,23	155,86	2,77	OK
3797,81	3821,94	3751,86	3790,54	35,60	0,77	OK

Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

O ensaio de Dano por Umidade Induzida (DNIT 180/2018) foi realizado para as duas misturas asfálticas analisadas. Desse modo, o valor de RRT consiste num ensaio longo se comparado com os citados anteriormente, principalmente, por possuir muitas etapas de refrigeração e banho-maria. Ele foi realizado para cada mistura em uma duração média de três dias consecutivos. É o principal indicador de laboratório para avaliar a suscetibilidade da mistura ao dano causado pela presença de água. A MREF obteve valor de RRT igual a 73,1% e a MM obteve RRT = 75,5%, portanto, a MM demonstra uma resistência pouco superior ao dano por umidade. Essa melhoria pode ser atribuída à natureza química do LCCA; como ressaltam

Oliveira *et al.* (2016) e Silva (2021), muitos bioaditivos de base vegetal contêm componentes polares que otimizam a força de ligação com a superfície do agregado, tipicamente hidrofílica. O RRT mede, indiretamente, a degradação da adesão entre o ligante e o agregado na presença de água. A modificação por meio do uso do LCCA melhorou a adesividade entre o ligante e o agregado. Muitos aditivos orgânicos ou de base vegetal (que é o caso de bioaditivos) contêm componentes polares que podem melhorar a força de ligação do asfalto com a superfície do agregado, que é tipicamente hidrofílica. A MM apresenta uma coesão inicial e a mantém de forma melhor na presença de água, indicando que o bioaditivo pode ter um efeito positivo secundário como agente *antistripping*, apesar de não ser seu propósito primário.

Para os resultados dos ensaios de Fadiga por Compressão Diametral, todavia, a análise direta mostra que, nos níveis de solicitação (principalmente 40%, 35%, 30% e 25% de tensão aplicada), o ensaio foi realizado sob o regime de tensão controlada. Neste regime, o critério de fadiga é geralmente estabelecido como uma relação entre o número de aplicações (N) e a deformação resiliente específica inicial. Para uma mesma tensão aplicada, uma mistura mais rígida (maior MR) tende a resultar em uma menor deformação inicial ($\sigma = Mr \cdot \epsilon_r$), conforme ressaltado anteriormente, sendo esse aumento de rigidez da MM o principal fator de distinção, isto é, o desempenho da mistura modificada apresentou capacidade abaixo em termos de vida de fadiga cíclica, em níveis de tensão mais baixos (30% e 25%). Todavia, a MREF se enquadrou na classe de fadiga 2, enquanto a MM concentrou-se na classe de fadiga 3, o que reflete a durabilidade esperada do material frente à propagação de trincas por carregamento cíclico, estando relacionado à resistência da estrutura. As Tabela 6 e Tabela 7 apresentadas ilustram os resultados.

Tabela 6 - Resultados ensaio de fadiga para a mistura de referência

RT: 1,21 MPa		Método de Moldagem: Giratório					T: 25°C	Frequência: 1Hz	
Corpos de prova:	Vv (%)	e (mm)	D (mm)	Nível de tensão (%)	Carga Aplicada (Kgf)	MR (MPa)	Def. Esp. Resiliente	Diferença de Tensões (MPa)	Nº Aplicações
REF-1	3,7%	67,33	100,30	40	523,6	4333	1,12E-04	1,94	932
REF-2	3,6%	66,18	99,79	40	512,1	4333	1,12E-04	1,94	2767
REF-3	3,8%	65,95	100,15	40	512,2	4333	1,12E-04	1,94	1459
REF-4	4,0%	67,11	99,87	35	454,7	4333	9,78E-05	1,70	2260
REF-5	4,5%	67,70	100,32	35	460,8	4333	9,78E-05	1,70	2088
REF-6	4,4%	67,43	99,98	35	457,4	4333	9,78E-05	1,70	2266
REF-7	3,9%	67,10	100,12	30	390,6	4333	8,38E-05	1,45	4846
REF-8	3,8%	66,41	100,12	30	386,7	4333	8,38E-05	1,45	3105
REF-9	3,6%	67,15	100,12	30	390,9	4333	8,38E-05	1,45	5167
REF-13	4,3%	67,29	100,08	25	326,3	4333	6,99E-05	1,21	12540

RT: 1,21 MPa		Método de Moldagem: Giratório				T: 25°C		Frequência: 1Hz	
Corpos de prova:	Vv (%)	e (mm)	D (mm)	Nível de tensão (%)	Carga Aplicada (Kgf)	MR (MPa)	Def. Esp. Resiliente	Diferença de Tensões (MPa)	Nº Aplicações
REF-11	3,8%	66,82	100,12	25	324,2	4333	6,99E-05	1,21	6589
REF-12	3,7%	66,25	100,03	25	321,2	4333	6,99E-05	1,21	13283

Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

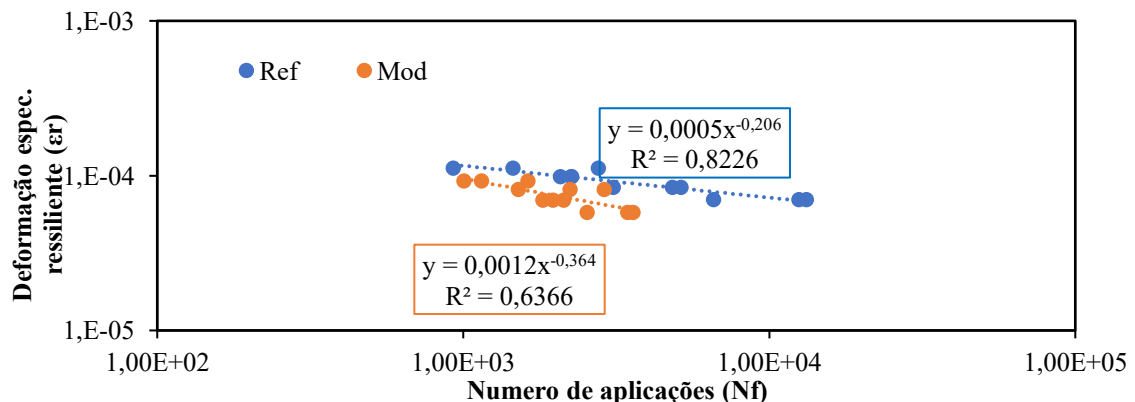
Tabela 7 - Resultados ensaio de fadiga para a mistura modificada

RT: 1,33 MPa		Método de Moldagem: Giratório				T: 25°C		Frequência: 1Hz	
Corpos de prova:	Vv (%)	e (mm)	D (mm)	Nível de tensão (%)	Carga Aplicada (Kgf)	MR (MPa)	Def. Esp. Resiliente	Diferença de Tensões (MPa)	Nº Aplicações
MM-4	4,7%	67,78	100,49	40	580,5	5756	9,25E-05	2,13	1633
MM-5	4,4%	67,22	100,53	40	575,9	5756	9,25E-05	2,13	1150
MM-6	4,4%	66,96	100,49	40	573,6	5756	9,25E-05	2,13	1009
MM-7	3,9%	66,79	100,31	35	499,7	5756	8,09E-05	1,86	2897
MM-8	4,5%	65,47	100,22	35	489,4	5756	8,09E-05	1,86	1516
MM-9	5,5%	67,39	100,33	35	504,3	5756	8,09E-05	1,86	2243
MM-10	4,7%	66,85	100,33	30	428,8	5756	6,94E-05	1,60	1973
MM-12	4,3%	67,36	100,35	30	432,1	5756	6,94E-05	1,60	2136
MM-13	5,1%	68,17	100,41	30	437,6	5756	6,94E-05	1,60	1823
MM-15	4,1%	67,09	100,38	25	358,8	5756	5,78E-05	1,33	3457
MM-17	4,3%	67,49	100,55	25	361,5	5756	5,78E-05	1,33	2549
MM-18	4,2%	68,50	100,49	25	366,7	5756	5,78E-05	1,33	3592

Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

Para ilustrar os dados obtidos no ensaio, foi elaborado a curva de fadiga correspondente para as duas misturas estudadas. A caracterização da resistência à fadiga das misturas de referência e modificada resultaram nas equações de potência apresentadas no Gráfico 4. O modelo estatístico da MM apresentou um coeficiente de determinação R^2 0,6366.

Gráfico 4 - Curva de fadiga das misturas asfálticas



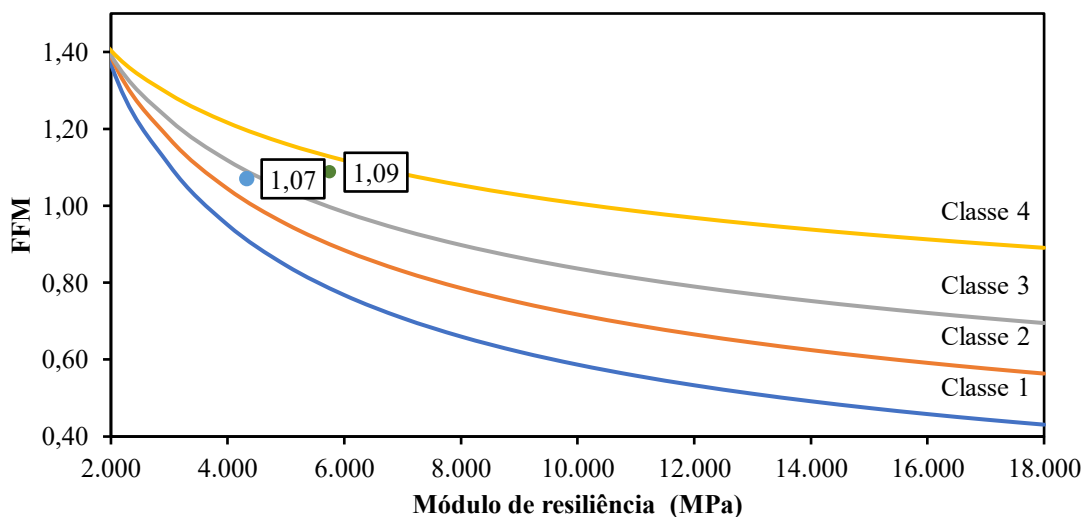
Fonte: elaborada pelo autor. (2026)

Embora o valor de R^2 indique uma dispersão moderada dos dados experimentais, ele é representativo para ensaios de fadiga por compressão diametral em misturas asfálticas. Segundo Medina e Motta (2015) a variabilidade pode acontecer devido à heterogeneidade do material asfáltico, composto por diferentes graduações de agregados e vazios e à sensibilidade do ensaio de tração indireta sob carregamento cíclico. Portanto, o ajuste obtido descreve fielmente a tendência de perda de vida útil do material sob diferentes níveis de tensão, fornecendo parâmetros robustos para a modelagem mecanicista no *software* MeDiNa.

Ademais, o Fator de Fadiga da Mistura (FFM) é calculado a partir da relação entre o número de ciclos, comparando-os, cuja a mistura asfáltica suporta até a ruptura sob diferentes níveis de deformação, sendo os resultados foram 1,09 para a MM e 1,07 para a REF, sugerindo que ambas as misturas têm sensibilidade similar à variação de tensão, com a mistura modificada sendo ligeiramente superior, conforme visualiza-se no

Gráfico 5 retirado na planilha de dimensionamento. Sendo MREF o ponto azul classificado na classe 2 de fadiga e o ponto verde correspondente a MM classificado na classe 3 de fadiga.

Gráfico 5 - Classe de fadiga das misturas asfálticas



Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

As classes de fadiga, classificam as misturas asfálticas em uma escala de 1 a 4 com base na relação entre o Módulo de Resiliência (MR) e a deformação admissível. Essa transição de classe indica que a modificação do ligante proporcionou um incremento na resistência ao dano por fadiga, permitindo que a mistura suporte um número significativamente maior de solicitações de carga antes do trincamento estrutural, mesmo apresentando um módulo de

rigidez mais elevado.

Nesse viés, um importante achado deste estudo é a demonstração de que o LCCA resultou em uma mistura mais rígida (maior MR) e com maior resistência à tração, todavia, apresentou um desempenho inferior à fadiga em níveis mais baixos de tensão. Em ensaios de fadiga à tensão controlada, misturas asfálticas mais rígidas tendem a apresentar menor vida de fadiga, isso se deve ao fato de que materiais com esse comportamento acumulam dano (redução do módulo) de forma mais rápida para uma tensão constante.

O critério de falha adotado nesta análise fundamenta-se no ensaio de fadiga por compressão diametral sob tensão controlada, conforme a metodologia empregada para a determinação da vida de fadiga (Nf) e da classe de resistência do material. Ao analisar os dados sob a perspectiva da tensão aplicada, observa-se que a mistura modificada com 2% de LCC, por apresentar maior rigidez, desenvolve deformações específicas de tração menores para um mesmo nível de carregamento quando comparada à mistura de referência (REF)

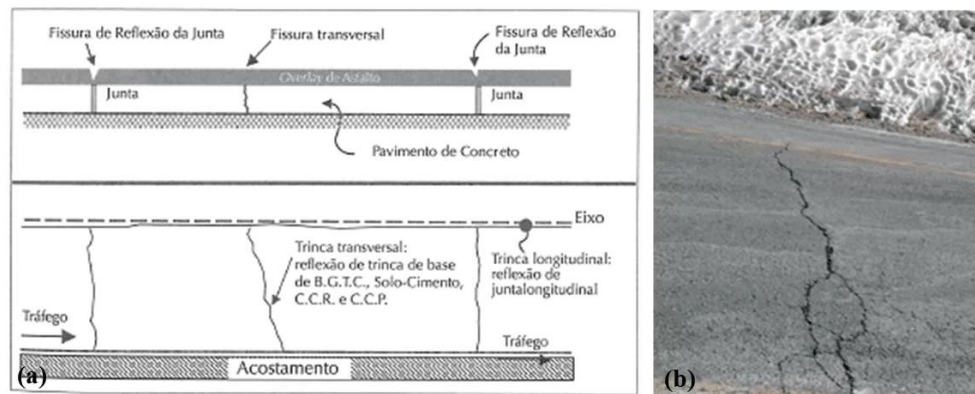
Ademais, com base nos relatórios gerados pelo *software* MeDiNa v2.0.0 para os projetos dos dois revestimentos estudados, a estrutura modificada mostrou um reflexo direto dessa melhoria na evolução do dano por fadiga ao final do período de projeto de 10 anos. Cabe salientar que a evolução da área trincada consiste em um indicador imprescindível no que tange à degradação estrutural e funcional de um pavimento asfáltico, representando o percentual da superfície da faixa de tráfego que apresenta trincas por fadiga. Em síntese, ela quantifica o dano acumulado na camada de revestimento devido à repetição de cargas dos eixos dos veículos, em outras palavras, cada passagem de um eixo padrão gera uma determinada deformação de tração na fibra inferior da camada de asfalto, com o tempo, essas fissuras irão se propagar até a superfície, formando as trincas do tipo “couro de jacaré” que são visuais nas vias de tráfego no dia a dia. Sob essa óptica, a velocidade com que a área trincada evolui indica quão rápido o pavimento está "consumindo" sua resistência projetada em 120 meses. Pode-se exemplificar uma evolução rápida de área trincada, quando a estrutura é muito flexível ou quando o material asfáltico é frágil para o volume de tráfego (N) solicitado, servindo como um critério de falha importante. Valores elevados de trincamento explicam que o pavimento perdeu sua capacidade de impermeabilização, permitindo que a água penetre nas camadas granulares (Base e Sub-base), o que levaria ao surgimento de buracos e deformações severas, por exemplo.

As fendas do tipo couro de jacaré são aquelas caracterizadas por uma série de fendas longitudinais paralelas. Elas representam o estágio avançado de fadiga. Inicialmente apresentam-se de forma isolada (

Figura 9 (a)). À medida que progredem com o tempo, interligam-se e ficam com o

aspecto de pele de crocodilo (b).

Figura 9 - Esquema de trinca isolada (a) e sua imagem real (b)



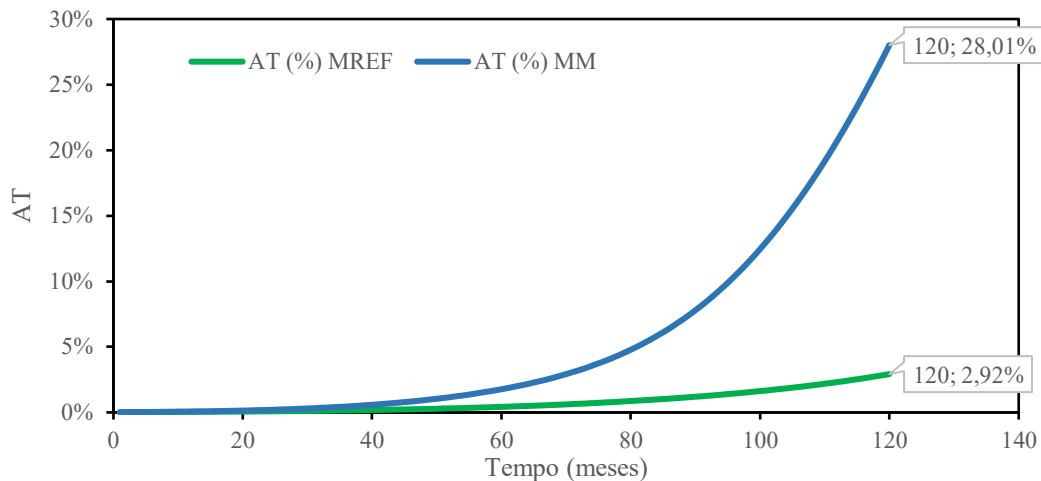
Fontes: Bernucci, 2006, p. 418; Silva, 2008, p. 37.

Com base nos relatórios emitidos na simulação, a estrutura modificada apresentou um desempenho técnico superior à estrutura de referência (ao longo do período de projeto de 10 anos. Enquanto a MREF atingiu um nível crítico de 28,01% de área trincada ao fim de 1×10^7 solicitações de eixo padrão, a estrutura modificada manteve a integridade da superfície com apenas 2,92% de trincamento, ambas para espessura de revestimento equivalente a 6 cm, sendo dimensionado (F2) para a mistura de referência e analisada a estrutura (F3) para mistura modificada. Esse comportamento demonstra que a modificação química e estrutural do revestimento asfáltico amplia significativamente a vida útil à fadiga do pavimento. Embora, também tenha sido realizado o dimensionamento para mistura modificada, os resultados obtidos foram, respectivamente para espessura, área trincada e ATR: 5cm, 3,5% e 7,9mm, sendo ainda sim satisfatórios para a mistura em se tratando de uma análise individual. Nesse sentido, a adoção da mistura modificada se destaca não apenas pelo ganho de durabilidade, bem como pela sustentabilidade e economia de recursos no projeto, otimizando o consumo de ligante convencional em relação ao desempenho entregue. O cenário da MM melhora as propriedades mecânicas da camada de rolamento, protegendo não somente as camadas granulares, bem como o subleito de forma mais eficiente do que a MREF.

A partir do que foi apresentado, foi elaborado o Gráfico 6, cujo objetivo é observar a evolução do trincamento em 10 anos de projeto, como os dois revestimentos se comportam, adotando um N anual (1º ano) = 1×10^6 pro início da vida do pavimento, considerado um tráfego médio, um fator de veículo (FV) unitário com configuração de eixo simples de roda dupla, em que a solicitação do tráfego corresponde diretamente ao eixo padrão de 8,2 toneladas. e um tipo de via: Sistema Arterial Primário com grau de confiabilidade de

85%, área trincada de 30% e deformação permanente de 13mm, segundo dados extraídos do conteúdo do software na aba Carregamento – Tipo de Vias. Optou-se por não analisar um tráfego misto para observar a divergência na área trincada fosse atribuída unicamente à melhoria das propriedades mecânicas do revestimento e não a variações na agressividade do tráfego.

Gráfico 6 - Representação da evolução da área trincada



Fonte: elaborada pelo autor. (2025)

A análise dos resultados, portanto, reforça a tese de que a introdução do bioaditivo causou um efeito significativo na capacidade da mistura de resistir ao acúmulo de dano cíclico. Outrossim, existem pontos de atenção na elaboração da mistura modificada, este efeito pode ser atribuído a fatores como:

1. Relação entre Rigidez e Flexibilidade: O aumento no MR sugere que a modificação da mistura tenha ganhado rigidez, o que favorece, por exemplo, resistência à deformação permanente. Todavia, incrementos excessivos na rigidez do ligante podem resultar em uma redução da capacidade de dissipação de energia sob carregamento cíclicos, podem tornar a mistura mais susceptível à propagação de trincas por fadiga (Bernucci *et al.*, 2022).
2. Volume de Vazios Maior: Cabe uma atenção ao Vv, pois esse parâmetro foi ligeiramente superior na mistura modificada. Mesmo que o bioaditivo melhorasse intrinsecamente o desempenho do ligante, uma geometria de vazios desfavorável, dada, por exemplo, devido à dificuldade de compactação manual de uma mistura modificada, promove a criação de concentradores de tensão que podem anular o benefício do aditivo. A mistura com bioaditivo apresenta uma pequena dispersão nos valores de Vv em duas amostras. Notavelmente, os CPs com Vv mais alto, nesse caso: CP MM-13 com 5,1% e CP MM-

9 com 5,5%) estão associados a uma vida de fadiga inferior dentro de seus respectivos níveis de tensão. Em contrapartida, a mistura de referência se manteve com média de 3,93% de Vv.

3. A aparente contradição entre os resultados isolados de laboratório e a simulação, pode ser explicada pela interação entre a rigidez do material e a solitação estrutural real a que o pavimento é submetido. Ao analisar as tabelas de ensaio, foi notado que a MREF apresenta um fator de fadiga k_2 de -3,28, indicando uma curva de fadiga com inclinação mais acentuada em comparação ao k_2 de, aproximadamente, -1,75 da MM. Em ensaios de laboratório sob tensão controlada, materiais menos rígidos podem apresentar um número de ciclos maior para determinadas cargas por serem mais deformáveis, isso explica o motivo dos pontos da mistura REF sugerem uma resistência intrínseca que, isoladamente, parece superior.

No entanto, o MeDiNa não avalia o material no vácuo, mas sim dentro de um sistema de camadas cujo Módulo de Resiliência desempenha um papel crucial na proteção da própria camada asfáltica. O LCCA atuou como um forte agente de enrijecimento, o que representa um benefício direto frente à deformação permanente, contudo, tal característica poderia sugerir, um comprometimento da capacidade do ligante em resistir ao acúmulo de dano sob carregamento cíclico por alterar as propriedades de relaxamento de tensão. Todavia, as simulações realizadas no *software* contradizem a hipótese de fragilização excessiva, apresentando resultados de desempenho positivos para o escopo da pesquisa.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa investigou a viabilidade técnica da incorporação de 2% do bioaditivo LCCA em ligantes asfálticos CAP 50/70, avaliando seu impacto no desempenho mecânico e na durabilidade estrutural por meio de ensaios laboratoriais (RT, MR, DUI e Fadiga CD) e levantamento bibliográfico. A análise mecanicista realizada no *software* MeDiNa permitiu uma comparação isonômica entre as misturas asfálticas ao fixar as espessuras e camadas da seção transversal, demonstrando que houve benefícios, na otimização das propriedades mecânicas do revestimento, embora moderada nos ensaios monotônicos, resultou em uma redução de 89,5% na área trincada final, evidenciando uma evolução significativa no desempenho estrutural do pavimento. Os principais avanços identificados com a mistura modificada (MM) foram:

- Incremento na resistência cíclica: A mistura de referência foi classificada como classe de fadiga 2, enquanto a mistura modificada atingiu a classe de fadiga 3, indicando uma capacidade superior de suportar repetições de carga sem ruptura prematura.
- Elevação da rigidez e coesão: O valor de Módulo de Resiliência (MR) elevou-se de 4.333MPa para 5.756MPa e a Resistência à Tração (RT) aumentou de 1,21 MPa para 1,33 MPa, garantindo uma estrutura simultaneamente mais rígida e resistente.
- Redução significativa da previsão do trincamento por fadiga: A área trincada final no cenário de referência atingiu críticos 28,01%, enquanto o cenário modificado encerrou o período de 10 anos com apenas 2,92%.
- Melhoria na proteção das camadas granulares: O maior MR do revestimento modificado reduziu as tensões transmitidas, resultando em um ATR total de 7,5 mm, comparado aos 7,7 mm da referência.

Esse comportamento superior frente à fadiga e à deformação permanente ratifica uma possível viabilidade técnica do uso de derivados de óleos vegetais na pavimentação asfáltica. A transição de um trincamento severo para níveis mínimos de degradação sob o mesmo tráfego de número N igual a 1×10^7 comprova que o enrijecimento proporcionado pelo LCCA não induziu fragilidade, mas sim uma sinergia benéfica entre resistência e flexibilidade cíclica. Além dos ganhos técnicos, a solução alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9 e 11 da ONU ao promover uma infraestrutura resiliente com menor demanda por manutenções corretivas. A redução da área trincada preserva a impermeabilidade do sistema, protegendo a base de brita graduada e o subleito siltoso contra a infiltração de água e a perda de capacidade de suporte. Conclui-se, que a mistura modificada com 2% de LCCA representa uma alternativa promissora para a engenharia viária brasileira, conciliando alta

performance mecânica com a sustentabilidade ambiental na construção de rodovias de sistema arterial primário.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15184:2021 – Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro, 2021.
- ALBUQUERQUE, F. S. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- ALCANTARA, A. P. M. P. et al. **Diagnóstico de emissões de poluentes atmosféricos na produção de misturas asfálticas**. [S. l.: s. n.], 2023.
- BAHIA, H. U.; ZHAI, H.; ZENG, M.; HU, Y.; TURNER, P. **Development of binder specification parameters based on characterization of damage behavior** (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 70, p. 442–470, 2002.
- BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, RJ: s.n., 2022.
- BESSA, I. S. Avaliação do dano por umidade e da adesividade de ligantes asfálticos. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- BIANCHI, F. R.; BRITO, I. R. T.; CASTRO, V. A. B. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível**. Apresentação. Associação de Ensino Superior Unificado do Centro Leste, 08 de setembro de 2008.
- BINDU, C. S.; JOSEPH, M. S.; SIBINESH, P. S.; GEORGE, S; SIVAN, S. **Performance evaluation of warm mix asphalt using crumb rubber and cashew nut shell liquid modified bitumen**. *International Journal of Pavement Research and Technology*, [s. l.], v. 13, p. 442–453, 2020.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 031/2006-ES: **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR, 2006.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006. (Publicação IPR, 719).
- BRINGEL, R. M. **Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos**. 2007. 174 fl. Dissertação (Mestrado em Química), Curso de Pós Graduação em Química Inorgânica, Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, CE, 2007.
- DNIT 031/2024 – ME. Pavimentação – Concreto Asfáltico – Especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2024.
- DNIT 135/2018 – ME: **Misturas asfálticas – Determinação da Rigidez por Compressão Diametral sob Carga Repetida**. Rio de Janeiro, 2018.

- DNIT 136/2018 – ME: **Concreto Betuminoso Usinado a Quente – Mistura asfáltica com CAP 50/70 e agregados.** Rio de Janeiro, 2018.
- DNIT 180/2018 – ME: **Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.
- DNIT 183/2018 – ME: **Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.
- DNIT 412/2025 – ME: **Agregados – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos por peneiramento – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2019.
- DNIT 427/2020 – ME: **Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2020.
- DNIT 449/2024 – PRO: **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Parâmetros volumétricos para dosagem de misturas asfálticas – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2024.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Ciência que Transforma: Resultados e Impactos Positivos da Pesquisa Agropecuária na Economia, no Meio Ambiente e na Mesa do Brasileiro.** Embrapa, 2020.
- FINI, E. H.; KALBERER, E. W.; SHABAZI, G. **Application of Bio-Binder from Swine manure in Asphalt Binder** In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 90TH ANNUAL MEETING, 2011, Washington. Proceedings Washington D.C., United States, 2011.
- FRANCO, L. S.; MOTTA, L. M. G. **MeDiNa: Método de Dimensionamento Nacional.** Versão 2.0.0. Rio de Janeiro: UFRJ/IPR/DNIT, 2025.
- GOMES, A. A.; SILVA, I. P. M.; MARQUES, R. C. **Influência de aditivos de base vegetal em ligantes asfálticos convencionais.** Revista Transportes, v. 27, n. 1, p. 67–75, 2019.
- IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Boletim de Logística e Infraestrutura.** Brasília: IPEA, 2019.
- LEITE, L.; CHACUR, M.; NASCIMENTO, L.A.; CRAVO, M.C.; MARTINS, A.T. **The Use of Vegetal Products as Asphalt Cement Modifiers.** In: 5TH EUROASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 2012, Istanbul. Proceedings of 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Instambul, 2012a.
- LO PRESTI, D. **Recycled tyre rubber modified bitumens for road paving: A review of mobilising additives, agitating equipment and field applications.** Construction and Building Materials, v. 49, p. 868–881, 2013.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.
- OLIVEIRA, J. R. M.; SILVA, H. M. R. D.; PEREIRA, P. A. A. **Bio-binders as sustainable alternatives to traditional asphalt binders – A review.** Construction and Building Materials, v. 262, 2020.

OLIVEIRA, M. S.; FARIAS, M. M.; SILVA, J. S. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com asfalto recuperado**. Estudos de Caso em Materiais de Construção, v. 16, e01132, 2022.

OLIVEIRA, A. H.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, S. de A. **Evaluation of the Cashew Nut Shell Liquid (CNSL) antioxidant characteristics for asphaltic materials using different aging procedures**. In: EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 6., 2016, Prague. **Proceedings [...]**. Prague: E&E, 2016. p. 1-10. DOI: 10.14311/EE.2016.300.

ONOFRE, F. C.; SOUZA, L. S.; LIMA, A. P. **Avaliação do efeito de ligantes modificados na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas**. Revista Transportes, v. 21, n. 3, p. 14–21, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/doi:10.4237/transportes.v21i3.685>.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Transformando nosso mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015.

NCHRP. **A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary**. (NCHRP Report 673). National Cooperative Highway Research Program. Washington, D.C.: 2011.

PEREIRA, P. A. A.; MOTTA, L. M. G. **Engenharia de pavimentos: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

PEREIRA, P. A. A.; SOARES, J. B.; MELLO, V. F. C.; CASTRO, M. C. F. **Asfaltos modificados e misturas mornas: alternativas sustentáveis para pavimentação**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 8, n. 2, p. 286–305, 2015.

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**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

ROCHA, W. S. **Desenvolvimento de bioaditivos para aprimoramento das propriedades de ligantes asfálticos utilizando óleo de mamona e o líquido da casca da castanha de caju**. 94 f. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

SANTOS, L. G.; FERNANDES, D. R.; RODRIGUES, F. M.; ALMEIDA, J. M. **Uso de óleos vegetais residuais na modificação de ligantes asfálticos**. In: Congresso Brasileiro de Asfalto, 2021.

SANTOS, J. B. **Uso de óleos vegetais como agentes rejuvenescedores e modificadores de ligantes asfálticos**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

SILVA, C. A. **Desenvolvimento de ligantes asfálticos modificados por bioaditivos**. 2017. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

SILVA, T. R.; AZEVEDO, A. R. G.; CECCHIN, D.; MARVILA, M. T.; AMRAN, M.; FEDIUUK, R.; VATIN, N.; KARELINA, M.; KLYUEV, S.; SZELAG, M. **Application of plastic wastes in construction materials: A review using the concept of life-cycle**

assessment in the context of recent research for future perspectives. *Materials*, v. 14, n. 13, 2021.

SILVA, J.; RODRIGUES, J. K. G.; CARVALHO, M. W.; LUCENA, L. C. F. L.; CAVALCANTE, E. H. **Mechanical performance of asphalt mixtures using polymer-micronized pet-modified binder.** *Road Materials and Pavement Design*, Taylor Francis, v. 19, n. 4, p. 1001–1009, 2018.

UCHOA, A. F. J. et al. **Exploiting epoxidized cashew nut shell liquid as a potential bio additive to improve asphalt binder performance.** *Journal of Cleaner Production*, v. 314, 10 set. 2021.