



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
ÁREA GEOTECNIA**

**Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas e descontínuas
produzidas com asfalto-borracha**

Arthur Nóbrega de Sousa

Campina Grande – PB

2026

Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas e descontínuas produzidas com asfalto-borracha

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

Área de concentração: Geotecnia

Linha de Pesquisa: Mecânica e Gerência de Pavimentos

Orientador: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

Coorientador: Prof. Dr. Jonny Dantas Patrício

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

S725a Sousa, Arthur Nóbrega de.
Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas e descontínuas produzidas com asfalto-borracha / Arthur Nóbrega de Sousa. – 2026.
175 f. : il. color.
Dissertação (mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2026.
“Orientação: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues, Prof. Dr. Jonny Dantas Patrício”.
Referências.
1. Gap-Graded. 2. Deformação Permanente. 3. SSR. 4. Flow Number. 5. RSI. 6. Fadiga. 7. S-VECD. I. Rodrigues, John Kennedy Guedes. II. Patrício, Jonny Dantas. III. Título.

UFCG/BC

CDU 625.878(043.3)

ARTHUR NÓBREGA DE SOUSA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS E DESCONTÍNUAS
PRODUZIDAS COM ASFALTO-BORRACHA

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 27 de fevereiro de 2026

DR. JONNY KENNEDY GUEDES RODRIGUES
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
ORIENTADOR

DR. JONNY DANTAS PATRÍCIO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
COORIENTADOR

DR. ADRIANO ELÍSIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
EXAMINADOR INTERNO

DR. MARIO SERGIO DE SOUSA ALMEIDA
UNIVERSIDADE RURAL DA BAHIA
EXAMINADOR EXTERNO

LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELO
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE
EXAMINADOR EXTERNO

CACILDO DE MEDEIROS BRITO CAVALCANTI
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE



EXAMINADOR EXTERNO

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

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

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

2. **ALUNO(A): ARTHUR NÓBREGA DE SOUSA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR. JONNY DANTAS PATRÍCIO - UFG - COORIENTADOR, DR. ADRIANO ELÍSIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFMG - EXAMINADOR INTERNO, DR. MARIO SERGIO DE SOUZA ALMEIDA - UFRB - EXAMINADOR EXTERNO, DR. LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO - DNIT - EXAMINADOR EXTERNO, DR. CACILDO DE MEDEIROS BRITO CAVALCANTE - DNIT - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 06/2026). / TITULO DA DISSERTAÇÃO: "AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS E DESCONTÍNUAS PRODUZIDAS COM ASFALTO-BORRACHA" / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 14:00 HORAS / NA SALA DE VIDEOCONFERÊNCIA DO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**

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

4. **CAMPINA GRANDE, 27 DE FEVEREIRO 2026**

5.

6.


7.

8.

9. **LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO - DNIT - EXAMINADOR EXTERNO**

10.

11.

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO**
 Data: 03/03/2026 14:27:58-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

12.

MARIO SERGIO DE SOUZA ALMEIDA
Data: 03/03/2026 10:02:50-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

13.

14.

MARIO SERGIO DE SOUZA ALMEIDA - UFRB - EXAMINADOR EXTERNO

Documento assinado eletronicamente por **Arthur Nóbrega de Sousa, Usuário Externo**, em 02/03/2026, às 15:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cacildo de Medeiros Brito Cavalcante, Usuário Externo**, em 02/03/2026, às 15:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 02/03/2026, às 15:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/03/2026, às 15:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jonny Dantas Patricio, Usuário Externo**, em 02/03/2026, às 21:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, PROFESSOR**, em 02/03/2026, às 21:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **6282869** e o código CRC **1B573BBF**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, agradeço por me conceder saúde, força, sabedoria e perseverança para superar os desafios e concluir mais esta etapa da minha formação.

À minha família, expresso minha profunda gratidão pelo apoio incondicional, pela confiança e pela base afetiva que sempre sustentou minha trajetória. De modo muito especial, agradeço à minha bisavó Francisca Leopoldina da Nóbrega e à minha tia Alda Maria da Nóbrega. Se não fosse por elas, eu não estaria onde estou hoje. Tudo o que sou — como homem e como pessoa — foi construído a partir dos seus ensinamentos, do cuidado, da disciplina, do exemplo e dos valores que me transmitiram. Carrego comigo o caráter, a honra e a retidão que aprendi com elas, e reconheço que essa conquista também é delas.

À minha namorada, Kalinny de Araújo Alves, expresso meu carinho e minha gratidão pelo apoio constante, pela compreensão e pela paciência em cada fase desta jornada. Obrigado por estar ao meu lado nos momentos mais exigentes, pelas palavras de incentivo, pela tranquilidade que me transmitiu e por acreditar em mim mesmo quando eu duvidei. Sua presença, cuidado e parceria foram essenciais para que eu mantivesse o equilíbrio e a motivação até a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues, e ao meu coorientador, Dr. Jonny Dantas Patrício, registro minha sincera gratidão pela condução, confiança e apoio ao longo de todas as etapas desta pesquisa. Agradeço pelas orientações técnicas, pelas discussões e contribuições fundamentais, pela disponibilidade e pelo incentivo constante, que foram determinantes para o amadurecimento científico e para a consolidação deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), registro meu sincero agradecimento pelo companheirismo, pelas trocas de conhecimento e pelo suporte diário ao longo da minha caminhada acadêmica, especialmente durante as etapas experimentais, discussões técnicas e tratamento de dados. Em especial, agradeço a Leonardo Guedes, Manoel Leandro, Jadilson, Ana Maria, Adla, Paulo Marinho, Eloísa, João Pedro, Arthur, Lara, Ladjane, Joseildo, Gilson, Allan e Luana. A convivência no laboratório contribuiu de forma significativa para meu crescimento científico e profissional.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), agradeço pela oportunidade de formação e pelo ambiente acadêmico que viabilizou o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço a todos os professores do PPGECA pelas disciplinas ministradas, pelo conhecimento compartilhado, pela disponibilidade e pelas contribuições que fortaleceram minha formação e o amadurecimento técnico-científico deste trabalho.

Agradeço, também, a todos os funcionários que fazem parte da UFCG, cujo trabalho cotidiano é essencial para o funcionamento da instituição e para que estudantes e pesquisadores possam desenvolver suas

atividades com suporte e estrutura. Reconheço e valorizo o empenho de cada servidor, técnico e colaborador, que contribui direta ou indiretamente para a qualidade do ensino, da pesquisa e da extensão.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho — com palavras de incentivo, apoio técnico, amizade e colaboração. Cada contribuição foi importante para que este percurso se concretizasse.

RESUMO

O desempenho de misturas asfálticas é governado pela resposta viscoelástica e viscoplástica do sistema ligante-agregado sob carregamento repetido e variação térmica, sendo a deformação permanente e a fadiga os principais mecanismos de deterioração dos pavimentos flexíveis. A destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis tem impulsionado o uso de borracha como modificador de ligantes; contudo, sua aplicação requer a verificação do comportamento físico-reológico do ligante, incluindo estabilidade à estocagem e separação de fases, bem como a avaliação do desempenho mecânico das misturas em diferentes estruturas granulométricas. Assim, esta dissertação teve como objetivos caracterizar física e reologicamente o CAP 50/70 modificado com borracha LGF-40P nos teores de 5%, 10% e 15%, avaliar a separação de fases por ensaios reológicos e comparar o desempenho mecânico de misturas Faixa B (densa) e Gap-Graded (descontínua), conforme DNIT 112/2009-ES, com ênfase à deformação permanente e fadiga. A pesquisa foi conduzida em quatro etapas: produção dos ligantes modificados, caracterização físico-reológica e definição do teor de borracha, produção e avaliação das misturas, e análise de desempenho por ensaios mecânicos. A deformação permanente foi investigada pelos ensaios *Stress Sweep Rutting* (SSR) e *Flow Number* (FN), com aplicações no FlexMAT para diferentes macrorregiões, tendo o Rutting Strain Index (RSI) como indicador. A fadiga foi avaliada por Tração Direta, com aplicação do modelo S-VECD. Concluiu-se que a modificação do CAP 50/70 com borracha LGF-40P, especialmente no teor AB10, resultou em uma resposta reológica com boa recuperação elástica e menor suscetibilidade à deformação permanente. A reologia aplicada à estabilidade à estocagem mostrou-se indispensável para identificar e quantificar a separação de fases, indicando que parâmetros apenas físicos não descrevem adequadamente a homogeneidade do ligante modificado. No desempenho mecânico, a mistura Gap-Graded apresentou superioridade no conjunto das análises, com menores deformações no SSR, menor sensibilidade térmica e melhor resposta à fadiga no S-VECD em comparação à Faixa B.

Palavras-chave: Gap-Graded; Deformação Permanente; SSR; Flow Number; RSI; Fadiga; S-VECD.

ABSTRACT

The performance of asphalt mixtures is governed by the viscoelastic and viscoplastic response of the binder–aggregate system under repeated loading and thermal variation, with permanent deformation (rutting) and fatigue being the main deterioration mechanisms in flexible pavements. The environmentally sound management of end-of-life tires has driven the use of rubber as a binder modifier; however, its application requires verification of the binder’s physical and rheological behavior, including storage stability and phase separation, as well as evaluation of the mechanical performance of mixtures with different gradation structures. Thus, this dissertation aimed to physically and rheologically characterize a CAP 50/70 binder modified with LGF-40P tire rubber at 5%, 10%, and 15%, assess phase separation through rheological testing, and compare the mechanical performance of a dense-graded (Faixa B) mixture and a gap-graded mixture, according to DNIT 112/2009-ES, with emphasis on permanent deformation and fatigue. The research was carried out in four main stages: production of the modified binders; physical and rheological characterization and selection of rubber content; production and evaluation of the dense-graded and gap-graded mixtures; and performance assessment through mechanical testing. Permanent deformation was investigated using the Stress Sweep Rutting (SSR) and Flow Number (FN) tests, with FlexMAT applications for different macro-regions using the Rutting Strain Index (RSI) as an indicator. Fatigue was evaluated by direct tension, applying the S-VECD model. It was concluded that modifying the CAP 50/70 binder with LGF-40P rubber, particularly at the AB10 content, resulted in a more favorable rheological response, with good elastic recovery and lower susceptibility to permanent deformation. Rheology-based storage stability assessment proved essential to identify and quantify phase separation, indicating that physical parameters alone do not adequately describe the homogeneity of the modified binder. Regarding mechanical performance, the gap-graded mixture showed superior overall behavior compared to the dense-graded mixture, with lower SSR deformations, reduced thermal sensitivity, and improved fatigue response within the S-VECD framework.

Keywords: Gap-Graded; Permanent Deformation; SSR; Flow Number; RSI; Fatigue; S-VECD.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Temperaturas baixas de ensaio recomendadas para cada PG.....	62
Tabela 2: Classificação do <i>Rutting Strain Index</i> (RSI) em função do nível de tráfego (MESAL).....	64
Tabela 3: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados	68
Tabela 4: Nomenclatura empregada para identificação das amostras	75
Tabela 5: Proporção dos materiais utilizados na modificação	76
Tabela 6: Proporção dos agregados utilizados nas misturas	79
Tabela 7: Gmm para os teores avaliados	81
Tabela 8: Parâmetros volumétricos teor de 5,0 % Faixa B.....	82
Tabela 9: Parâmetros volumétricos teor de 5,5 % Faixa B.....	82
Tabela 10: Parâmetros volumétricos teor de 6,0 % Faixa B.....	82
Tabela 11: Parâmetros volumétricos obtidos para os teores de projeto de cada mistura	84
Tabela 12: Parâmetros geométricos e volumétricos dos corpos de prova FB e GG por tipo de ensaio	86
Tabela 13: Tabela resumo dos ensaios realizados no ligante referência (AV)	96
Tabela 14: Tabela resumo dos ensaios realizados nos ligantes modificados	97
Tabela 15: Resultado do ensaio de estabilidade a estocagem das amostras analisadas	115
Tabela 16: Coeficientes do Shift Model e variações relativas entre misturas	131
Tabela 17: Correlação climática Brasil–EUA adotada no FlexMAT e valores de RSI (%)	132
Tabela 18: Coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal utilizado para determinação do módulo dinâmico	138
Tabela 19: Coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal utilizado para determinação do módulo de armazenamento	142
Tabela 20: Tempos de relaxação (π) e módulos do elemento de ϵ axwell (E_i) para as séries de Prony	142
Tabela 21: Valores limites recomendados para o parâmetro Sapp a diferentes níveis de tráfego e Parâmetros de ajuste da função potência C11 e C12, coeficientes de regressão do critério GR, critério DR e valor de Sapp ...	147

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Ensaio dos agregados e normas	68
Quadro 2: Normas para caracterização física e reológica do ligante CAP 50/70.....	74
Quadro 3: Normas para caracterização física e reológica das amostras modificadas	77
Quadro 4: Especificações aplicáveis às camadas de rolamento com asfalto borracha.....	78
Quadro 5: Ensaio mecânicos realizados nas misturas	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo de logística reversa do pneu.....	20
Figura 2: Etapas do processo via úmida (<i>Terminal Blending</i>)	24
Figura 3: Curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas a quente	31
Figura 4: Representação das três principais classificações granulométricas	31
Figura 5: Representação das três principais classificações	33
Figura 6: Curvas granulométricas de utilizados para misturas asfálticas.....	34
Figura 7: Representação ilustrativa da Mistura Descontínua	35
Figura 8: Diagrama de Tensão x Deformação	37
Figura 9: a) Modelo de Maxwell generalizado (acima) e b) Modelo de Kelvin-Voigt generalizado (abaixo).....	39
Figura 10: Creep Compliance a) tensão aplicada; b) resposta de deformação	40
Figura 11: Módulo de Relaxação $E(t)$. (a) deformação aplicada; (b) resposta de tensão.....	41
Figura 12: Histórico de tensões impostas na função Fluência	41
Figura 13: Defasagem entre as ondas de tensão e de deformação durante solicitação harmônica em um material viscoelástico.....	43
Figura 14: Ilustração de curva mestra obtido no ensaio de módulo dinâmico.....	45
Figura 15: Curva característica de dano.....	47
Figura 16: Trinca/Fadiga em pavimento asfáltico	53
Figura 17: Deformação longitudinal na trilha de roda (deformação permanente)	56
Figura 18: Resposta da deformação devido ao carregamento dinâmico	57
Figura 19: Deformação plástica acumulada vs. ciclos (FN)	58
Figura 20: Curvas de deformação permanente para tensões progressivas e temperaturas <i>THE TL</i>	63
Figura 21: Fluxograma das etapas da pesquisa	67
Figura 22: Borracha triturada de pneus inservíveis passante na peneira nº 40	69
Figura 23: Termograma da borracha de pneu	70
Figura 24: Micrografias da borracha de pneu	71
Figura 25: Borracha triturada de pneus inservíveis passante na peneira nº 40	72
Figura 26: Espectro de FTIR para borracha	73
Figura 27: Agitador mecânico	76
Figura 28: Faixa B DNIT 112/2009 – ES	79
Figura 29: Faixa Gap Graded DNIT 112/2009 – ES.....	79
Figura 30: Gmm para os teores avaliados na Faixa B	81
Figura 31: Gmm para os teores avaliados na Faixa Gap Graded	81
Figura 32: Volume de vazios x Teor de ligante Faixa Gap Graded	84
Figura 33: Compactador giratório SERVOPAC IPC.....	86
Figura 34: Cilindro para moldagem dos corpos de prova.....	89

Figura 35: Preparação para o ensaio de SSR (a): Membrana com furo para drenagem do ar; (b): Posicionamento correto das membranas.....	90
Figura 36: Montagem do corpo de prova para o ensaio de SSR (a): Posicionamento das membranas redutoras de atrito; (b): Aplicação de vácuo para posicionamento da membrana; (c): Posicionamento da membrana no corpo de prova; (d): Corpo de prova devidamente montado.....	90
Figura 37: Condicionamento do corpo de prova para o ensaio de SSR na AMPT (a): Equipamento AMPT; (b): Condicionamento do corpo de prova.....	92
Figura 38: Inserção das dimensões do corpo de prova.....	92
Figura 39: Inserção dos parâmetros do ensaio.....	93
Figura 40: Gráfico de variação de massa do ensaio de RTFO.....	98
Figura 41: Gráfico do ensaio de penetração.....	99
Figura 42: Resultado do ensaio de ponto de amolecimento.....	100
Figura 43: Resultado do ensaio de recuperação elástica.....	102
Figura 44: Resultado de recuperação elástica antes e após o envelhecimento a curto prazo (RTFO).....	103
Figura 45: Resultado do ensaio de <i>performance grade</i> (PG).....	103
Figura 46: Resultado do $ G^* /\text{sen } \delta$ com a variação de temperatura antes do RTFO.....	105
Figura 47: Resultado do $ G^* /\text{sen } \delta$ com a variação de temperatura após o RTFO.....	106
Figura 48: Resultado do <i>Aging Index</i> (AI).....	107
Figura 49: Resultado das compliância não recuperáveis J_{nr} (kPa ⁻¹).....	108
Figura 50: Resultado de recuperação elástica (R%) no ensaio MSCR a 0,1 e 3,2 kPa.....	109
Figura 51: Resultados das curvas mestras do módulo complexo $ G^* $ dos ligantes analisados.....	111
Figura 52: Resultados das curvas mestras de ângulo de fase dos ligantes analisados.....	112
Figura 53: Curva de integridade (C) versus Dano (S).....	113
Figura 54: Curvas de Fadiga para amostras analisadas.....	114
Figura 55: Fator de Fadiga do Ligante determinado a 19 °C (FFL).....	114
Figura 56: Resultado do ensaio de PG das amostras estudadas separando topo e base após estocagem.....	116
Figura 57: Resultados de curvas mestras de $ G^* $ (a) e δ^* (b) asfalto contendo 5% de borracha.....	117
Figura 58: Resultados de curvas mestras de $ G^* $ (a) e δ^* (b) asfalto contendo 10% de borracha.....	118
Figura 59: Resultados de curvas mestras de $ G^* $ (a) e δ^* (b) asfalto contendo 15% de borracha.....	119
Figura 60: Resultados de resistência à tração por compressão diametral.....	121
Figura 61: Resultados de estabilidade Marshall.....	123
Figura 62: Resultados de módulo de resiliência.....	124
Figura 63: Resultado do ensaio de dano por umidade induzida (DUI).....	125
Figura 64: Resultado do ensaio de <i>Flow Number</i> (FN).....	127
Figura 65: Deformação permanente medida vs. prevista (Faixa B).....	128
Figura 66: Deformação permanente medida vs. prevista (Gap graded).....	129
Figura 67: Deformação Permanente Média Vs Tempo (meses) Região Norte.....	133

Figura 68: Deformação Permanente Média Vs Tempo (meses) Região Nordeste	133
Figura 69: Deformação Permanente Média Vs Tempo (meses) Região Sul.....	134
Figura 70: Deformação Permanente Média Vs Tempo (meses) Região Sudeste.....	134
Figura 71: Deformação Permanente Média Vs Tempo (meses) Região Centro-Oeste.....	135
Figura 72: Curvas mestras das misturas das misturas asfálticas estudadas na temperatura de referência de 20°C, em escala log-log	139
Figura 73: Curvas mestras das misturas asfálticas estudadas na temperatura de referência de 20°C, em escala semi-log	139
Figura 74: Curvas mestras de ângulo de fase das misturas asfálticas estudadas na temperatura de referência de 20°C.....	140
Figura 75: Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase versus número de ciclos de ensaio de fadiga	143
Figura 76: Curvas características de dano das misturas asfálticas estudadas (25°C temperatura de ensaio) ..	144
Figura 77: Critério de ruptura baseado no GR.....	147
Figura 78: Ciclos de fadiga calculados para deformações pré-estabelecidas.....	148
Figura 79: Soma(1-C) e Nf.....	148

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

AB – Asfalto-borracha

AB10 – Ligante asfalto-borracha com 10% de borracha (em massa do ligante)

AB15 – Ligante asfalto-borracha com 15% de borracha (em massa do ligante)

AB5 – Ligante asfalto-borracha com 5% de borracha (em massa do ligante)

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

AFM – Microscopia de Força Atômica

AI – Aging Index (Índice de envelhecimento)

AMBS – Activated Mineral Binder Stabilizer (estabilizante mineral ativo)

AMP – Asfalto Modificado por Polímero

AMPT – Asphalt Mixture Performance Tester

ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP)

ANP – Agência Nacional do Petróleo (ANP)

ASTM – American Society for Testing Materials (ASTM)

BFF – Binder Fatigue Factor

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CGS – Compactador Giratório SUPERPAVE

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)

CP – Corpo de Prova

DER/PR – Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER/PR)

DMR – Dynamic Modulus Ratio

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)

DUI – Dano por Umidade Induzida

DSR – Dynamic Shear Rheometer

EMA – Etileno Metil Acrilato

ES – Especificação de Serviço

EVA – Etileno-Acetato de Vinila

FB – Faixa B (mistura densa)

FEL – Fatigue Endurance Limit

FFL – Fator de Fadiga do Ligante

FFM – Fator de Fadiga da Mistura

FHWA – Federal Highway Administration (FHWA)

FlexMAT – Software FlexMAT (simulações mecanístico-empíricas)

FN – Flow Number

FTIR – Fourier Transform Infrared

GG – Gap-Graded (mistura descontínua)

GMA – Glicidil Metacrilato

Gmb – Massa Específica Aparente Estimada

Gmm – Densidade Máxima da Mistura

HDPE – Polietileno de Alta Densidade

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA)

IDT – Indirect Tensile Test

INFRALAB – Laboratório de Infraestrutura da Faculdade de Tecnologia (Universidade de Brasília)

ISTEA – Intermodal Surface Transportation Efficiency Act

Jnr – Compliância não recuperável (non-recoverable creep compliance)

LAS – Linear Amplitude Sweep

LCPC – Ensaio de trilha de roda do LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)

LEP – Laboratório de Engenharia de Pavimentos

LGF-40P – Borracha de pneu manufaturada LGF-40P (material modificador do ligante)

LGL-40P – Borracha de pneu manufaturada LGL-40P (variação de grafia no texto)

LVDT – Linear Variable Differential Transformers

LVE – Comportamento Linear Viscoelástico

MD – Módulo Dinâmico

MR – Módulo de Resiliência

MSCR – Multiple Stress Creep Recovery

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PET – Polietileno tereftalato

PG – Performance Graded Asphalt Binder

PB – Paraíba

PP – Polipropileno

PPA – Ácido Polifosfórico

PPGECA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

RAR – Reacted and Activated Rubber

RBV – Relação Betume x Vazios

RECICLANIP – Programa de logística reversa de pneus da ANIP (Reciclanip)

RET – Terpolímeros Reativos de Etileno

RSI – Rutting Strain Index

RRT – Resistência Retida à Tração

RT – Resistência à Tração por Compressão Diametral

RTFO – Rolling Thin Film Oven (envelhecimento a curto prazo do ligante)

RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test

SAMI – Stress Absorbing Membrane Interlayer

SBR – Styrene Butadiene Rubber

SBS – Styrene Butadiene Styrene

SCB – Semi–Circular Bend Test

SSR – Stress Sweep Rutting

SUPERPAVE – Superior Performing Pavements

S-VECD – Simplified Viscoelastic Continuum Damage

TH – Temperatura alta (no SSR)

TL – Temperatura baixa (no SSR)

TSR – Tensile Strength Ratio (relação de resistência à tração – usada em dano por umidade)

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

VAM – Vazios do Agregado Mineral

VECD – Viscoelastic Continuum Damage

Vv – Volume de Vazios

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	16
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS	18
1.1.1 OBJETIVO GERAL	18
1.1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS	18
CAPÍTULO 2	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM BORRACHA DE PNEU	19
2.1.1. PANORAMA AMBIENTAL	19
2.1.2. HISTÓRICO E EVOLUÇÃO	21
2.1.3. PROCESSOS DE INCORPORAÇÃO	23
2.1.4. BENEFÍCIOS ESTRUTURAIS E FUNCIONAIS DO ASFALTO E BORRACHA	26
2.1.5. DESAFIOS TÉCNICOS E LIMITAÇÕES DA APLICAÇÃO DO ASFALTO BORRACHA	28
2.2. GRANULOMETRIA E ESTRUTURA INTERNA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	30
2.2.1. MISTURAS DENSAS (<i>DENSE-GRADED</i>)	33
2.2.2. MISTURAS DESCONTÍNUAS	35
2.3. VISCOELASTICIDADE DOS MATERIAIS ASFÁLTICOS	36
2.3.1. MODELO VISCOELÁSTICO DE DANO CONTÍNUO (VECD)	47
2.3.2. PRINCÍPIO DA CORRESPONDÊNCIA ELÁSTICO-VISCOELÁSTICO	48
2.3.3. TEORIA DO TRABALHO POTENCIAL	51
2.4. FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS	52
2.4.1. ENSAIO DE FADIGA POR TRAÇÃO DIRETA	54
2.5. DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS	56
2.6. STRESS SWEEP RUTTING (SSR)	59
2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
CAPÍTULO 3	67
3. MATERIAIS E MÉTODOS	67
3.1. MATERIAIS	68
3.1.1. AGREGADOS	68
3.1.2. BORRACHA	69
3.1.3. LIGANTE ASFÁLTICO 50/70	74
3.2. MÉTODOS	75
3.2.1. MODIFICAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO 50/70	76

3.2.2. ESCOLHA DA FAIXA GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS	78
3.2.3. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	78
3.2.4. MISTURA E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	84
3.2.5. ENSAIOS MECÂNICOS	86
3.2.6. FLOW NUMBER (FN)	87
3.2.7. STRESS SWEEP RUTTING (SSR).....	88
3.2.8. FADIGA POR TRAÇÃO DIRETA UNIAXIAL	93
<u>CAPÍTULO 4</u>	<u>96</u>
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
4.1. LIGANTES ASFÁLTICOS.....	96
4.1.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	97
4.1.2. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA.....	103
4.2. ENSAIOS MECÂNICOS.....	120
4.2.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (RT)	120
4.2.2. ESTABILIDADE MARSHALL	122
4.2.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)	123
4.2.4. DANO POR UMIDADE INDUZIDA (DUI).....	125
4.2.5. FLOW NUMBER (FN)	126
4.2.6. STRESS SWEEP RUTTING.....	128
4.2.7. FADIGA	138
4.2.8. FADIGA A TRAÇÃO DIRETA.....	142
<u>CAPÍTULO 5</u>	<u>150</u>
<u>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES</u>	<u>150</u>
5.1. CONSIDERAÇÃO FINAL.....	150
5.2. CONCLUSÃO	152
5.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	153
<u>CAPÍTULO 6</u>	<u>155</u>
<u>6. REFERÊNCIAS.....</u>	<u>155</u>

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O desempenho estrutural e funcional de pavimentos asfálticos em serviço é condicionado pela interação entre ligante, agregados e condições de carregamento e temperatura, de modo que a seleção de materiais e a caracterização mecanicista tornam-se decisivas para mitigar mecanismos de dano como a deformação permanente (afundamento em trilha de roda) e o trincamento por fadiga. Paralelamente, a infraestrutura viária tem incorporado, de forma progressiva, diretrizes de sustentabilidade e economia circular, impulsionando o uso de resíduos em soluções de engenharia, com destaque para a valorização de pneus inservíveis.

O descarte inadequado de pneus constitui um passivo ambiental e sanitário relevante, uma vez que esses resíduos apresentam elevada estabilidade físico-química e baixa degradabilidade, podendo persistir no ambiente e favorecer a proliferação de organismos transmissores de doenças, além de potenciais impactos sobre solo, água e atmosfera quando submetidos a práticas irregulares de disposição e queima (Brustolon; Paiva, 2022; Klinsky; Faria, 2017; IBAMA, 2023).

No Brasil, instrumentos normativos estruturam a responsabilidade compartilhada e o sistema de recolhimento pós-consumo com retorno obrigatório dos produtos ao ciclo produtivo (logística reversa), a exemplo da Resolução CONAMA nº 416/2009 e da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), as quais orientam a destinação ambientalmente adequada e priorizam hierarquias de gestão de resíduos. Nesse contexto, iniciativas setoriais de logística reversa e destinação coordenada têm ampliado a capilaridade do recolhimento e o encaminhamento a rotas tecnológicas de aproveitamento (ANIP, 2024; IBAMA, 2025).

Entre as rotas de maior interesse para a engenharia de pavimentos, destaca-se a incorporação de borracha moída de pneus a materiais asfálticos, seja pela via úmida (modificação do ligante) ou pela via seca (adição como fração do agregado). Essa estratégia tem sido associada a ganhos reológicos e mecânicos, incluindo aumento de elasticidade, redução de suscetibilidade térmica e potencial melhoria de desempenho frente à deformação permanente e ao trincamento por fadiga (Klinsky; Faria, 2017; Oliveira *et al.*, 2023; Specht, 2003). Além do benefício ambiental por reduzir o passivo de pneus, a aplicação em pavimentação pode contribuir para ampliar a vida útil do revestimento e reduzir demandas de manutenção quando adequadamente projetada e controlada (ANIP, 2024; IBAMA, 2023).

O nível de interação borracha–CAP e a estabilidade do produto dependem do processo de incorporação, o qual influencia diretamente a viscosidade, a resistência à deformação permanente e o comportamento à fadiga (Nunes, 2017; Lopes, 2022).

No processo a úmido, por exemplo, diretrizes normativas e recomendações técnicas descrevem condições de produção e parâmetros que visam garantir homogeneidade e desempenho, incluindo referências ao uso do asfalto-borracha “*Terminal Blending*” e à regulamentação aplicável (DNIT 111/2009-EM). A estrutura granulométrica do esqueleto pétreo é reconhecida como variável-chave para estabilidade volumétrica, trabalhabilidade e resposta mecânica, uma vez que a distribuição de tamanhos e o empacotamento governam o intertravamento interno, o teor de ligante requerido e a suscetibilidade a densificação e deformação sob tráfego. Assim, comparar misturas densas e descontínuas (*gap-graded*) sob um mesmo conceito de ligante modificado constitui uma abordagem pertinente para esclarecer a contribuição relativa do ligante e da granulometria nos mecanismos de deformação e fadiga.

Esta pesquisa tem como objetivo analisar, por meio de ensaios laboratoriais, o desempenho mecânico de misturas asfálticas densas (Faixa B) e descontínuas (*gap-graded*) produzidas com asfalto-borracha (ligante asfáltico modificado com borracha de pneu), contemplando desde a etapa de modificação do ligante até a resposta mecânica das misturas. Além da avaliação do comportamento das misturas, o estudo incorpora a caracterização física e reológica do ligante modificado, visando compreender como as mudanças promovidas pela incorporação da borracha influenciam a rigidez, a susceptibilidade térmica e a resistência à deformação permanente e à fadiga. Especificamente, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho mecânico das misturas Faixa B e *gap-graded* com asfalto-borracha por meio dos ensaios de deformação permanente (SSR) e de fadiga por tração direta, com aplicação do modelo S-VECD, estabelecendo relações entre as propriedades do ligante (físicas e reológicas) e o comportamento mecânico observado.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da modificação do ligante CAP 50/70 com borracha de pneu (LGF-40P), assim como o efeito da variação granulométrica (densa e descontínua) no desempenho mecânico de misturas asfálticas produzidas com o ligante modificado.

1.1.2 Objetivo Específicos

- Caracterizar o ligante asfáltico CAP 50/70 modificado com diferentes teores de borracha LGF-40P (5%, 10% e 15%, em massa do ligante), por meio de ensaios físicos convencionais e ensaios reológicos;
- Verificar a estabilidade à estocagem do ligante CAP 50/70 modificado com borracha LGF-40P, verificando a ocorrência de separação de fases por meio da análise reológica comparativa entre as amostras do topo e da base;
- Avaliar, por meio do ensaio de tração direta, o desempenho à fadiga de misturas asfálticas produzidas com asfalto-borracha, comparando a mistura densa (Faixa B) e a descontínua (gap-graded), com aplicação do modelo S-VECD;
- Avaliar a suscetibilidade à deformação permanente de misturas asfálticas produzidas com asfalto-borracha, por meio dos ensaios de Flow Number (FN) e Stress Sweep Rutting (SSR), comparando as faixas granulométricas densa (Faixa B) e descontínua (gap-graded).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresenta-se o referencial teórico que sustenta esta dissertação, reunindo os conceitos essenciais para contextualizar o tema e embasar a análise dos resultados. Inicialmente, são discutidos os fundamentos das misturas asfálticas e as particularidades associadas ao uso de borracha como modificador, bem como a influência da granulometria e da estrutura interna no desempenho mecânico. Em seguida, abordam-se os princípios de viscoelasticidade aplicados aos materiais asfálticos e os mecanismos de deterioração mais relevantes, com ênfase na deformação permanente e na fadiga. Por fim, são introduzidos os principais ensaios, parâmetros e abordagens de interpretação/modelagem utilizados no trabalho, estabelecendo a base técnica necessária para os capítulos seguintes.

2.1. Misturas Asfálticas Modificadas Com Borracha De Pneu

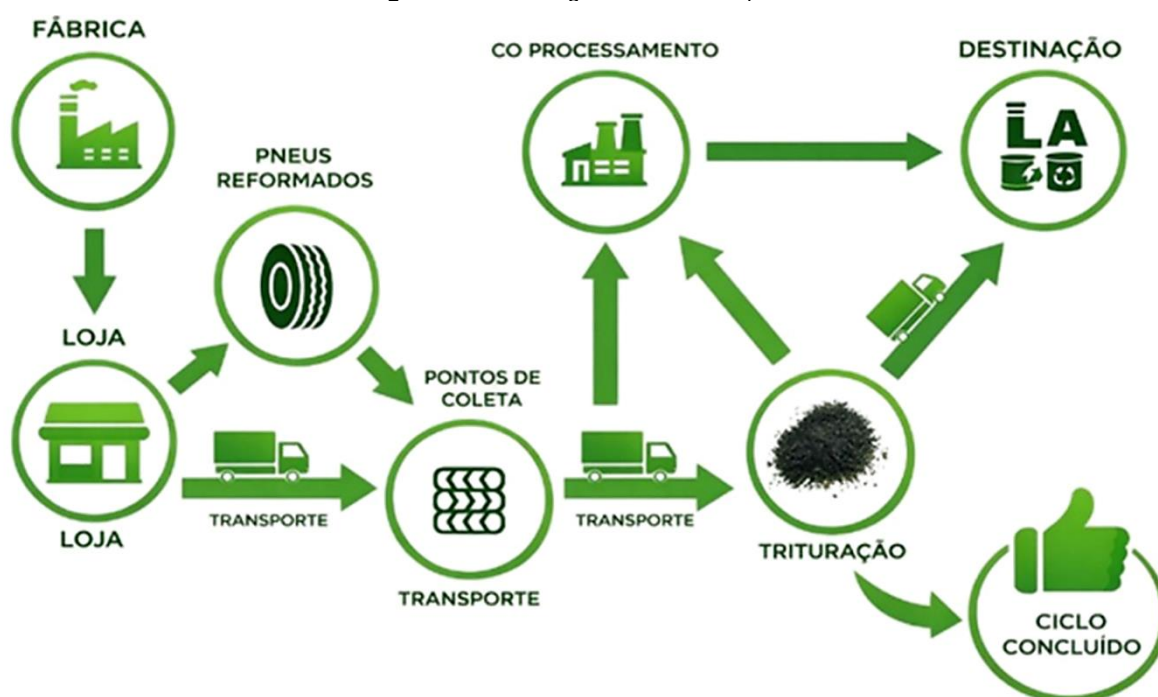
Neste item, discute-se o uso de borracha de pneu como modificador em ligantes e misturas asfálticas, destacando os princípios que explicam seu desempenho e as implicações práticas de aplicação. Inicialmente, são apresentadas as principais formas de incorporação do material borrachoso (via úmida e via seca) e os mecanismos de interação com o ligante, que podem alterar a resposta reológica e o comportamento em serviço. Em seguida, são abordados os efeitos esperados dessa modificação sobre defeitos críticos de pavimentos, como deformação permanente e fadiga, considerando a influência de parâmetros de dosagem, granulometria da borracha e condições de processamento. Por fim, sintetizam-se aspectos normativos e de controle tecnológico que orientam a produção e o uso dessas misturas, preparando a base para a apresentação e discussão dos subtópicos seguintes.

2.1.1. Panorama ambiental

O descarte de pneus inservíveis constitui um problema ambiental e sanitário de elevada relevância, associado à intensificação da produção em larga escala e ao consumo de bens duráveis sem planejamento adequado para reaproveitamento e reinserção em cadeias produtivas (Abdullah, 2024). Em razão de sua composição (borracha natural e sintética, negro de fumo, aço e aditivos químicos), os pneus apresentam alta estabilidade físico-química e baixa degradabilidade, podendo persistir no ambiente por longos períodos, com potencial de liberação de substâncias tóxicas para solos e corpos hídricos e de geração de emissões atmosféricas nocivas quando submetidos à queima irregular (Dwivedi *et al.*, 2020). Além disso, o acúmulo de pneus expostos favorece a retenção de água e cria microambientes propícios à proliferação de vetores, com destaque para o *Aedes aegypti*, ampliando o risco de arboviroses em áreas urbanas e periurbanas (Cofone *et al.*, 2025). No Brasil, a mitigação desse

passivo tem sido orientada por instrumentos normativos que estruturam a responsabilidade compartilhada e a logística reversa. A Resolução CONAMA nº 416/2009 estabelece obrigações de coleta e destinação ambientalmente adequada para fabricantes e importadores de pneus novos acima de 2 kg, enquanto a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) consolida a hierarquia de gestão, priorizando não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente apropriada (BRASIL, 2009; BRASIL, 2010). Embora tais mecanismos tenham impulsionado a organização da cadeia de retorno (Figura 1), desafios persistem, sobretudo em municípios de pequeno porte e regiões periféricas, em função de limitações de infraestrutura, dispersão territorial e custos de transporte, fatores que ainda contribuem para ocorrências de descarte irregular e queima clandestina (López-García *et al.*, 2025).

Figura 1: Ciclo de logística reversa do pneu



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

Nesse cenário, programas setoriais de logística reversa vêm desempenhando papel estratégico para ampliar a capilaridade da coleta e a eficiência da destinação. A ANIP, por meio da Reciclanip, coordena ações de recolhimento e encaminhamento de pneus em escala nacional, com volumes expressivos de remoção ambiental e ampla rede de pontos de coleta (ANIP, 2024). Dados oficiais recentes indicam elevada taxa de destinação ambientalmente adequada em relação às metas estabelecidas, evidenciando a consolidação progressiva do sistema brasileiro de logística reversa, sustentado por etapas integradas de coleta, processamento e reaproveitamento (IBAMA, 2025).

Quanto às rotas tecnológicas, o coprocessamento em fornos de cimento permanece como alternativa relevante por utilizar o alto poder calorífico do pneu como combustível substituto em temperaturas superiores a 1.400 °C, reduzindo a demanda por combustíveis fósseis e atendendo aos critérios de destinação definidos pela Resolução CONAMA nº 416/2009 (BRASIL, 2009). Entretanto, por não promover a reinserção material do resíduo no ciclo produtivo, seu alinhamento com os princípios de economia circular é limitado.

Em contraposição, estratégias de valorização, como a reciclagem mecânica e, sobretudo, o reaproveitamento em pavimentação asfáltica, destacam-se por agregarem valor ao resíduo e por contribuírem para o desempenho do revestimento. A trituração e moagem geram o pó de borracha moída (PBM), incorporado ao cimento asfáltico de petróleo pela via úmida (mistura em altas temperaturas, com modificação do ligante) ou pela via seca (adição do granulado como fração do agregado), originando misturas asfalto-borracha com maior elasticidade, menor suscetibilidade térmica e desempenho superior frente à deformação permanente e ao trincamento por fadiga (Jamieson *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2023). Além de reduzir o passivo ambiental e a incidência de descarte irregular, essa aplicação pode aumentar a vida útil do pavimento, diminuir demandas de manutenção e contribuir para ganhos funcionais, como redução do ruído de tráfego e melhoria da interação pneu-pavimento (Zhao *et al.*, 2024). Assim, a incorporação de borracha de pneus em misturas asfálticas configura uma alternativa tecnicamente consistente e ambientalmente estratégica, alinhada aos princípios de sustentabilidade e economia circular na infraestrutura viária (ANIP, 2024; IBAMA, 2023).

2.1.2. Histórico e Evolução

O desenvolvimento da tecnologia do asfalto-borracha está associado à busca por ligantes asfálticos mais duráveis e à necessidade de dar destinação ambientalmente adequada à borracha proveniente de pneus inservíveis. As primeiras experiências com a adição de borracha natural ao betume datam do século XIX, quando inventores europeus observaram que a incorporação desse polímero aumentava a flexibilidade e a aderência do material (Alfayez *et al.*, 2020). Conforme registrado por Francken (1998), o uso de compostos à base de betume e borracha natural remonta a 1823, quando o inglês Thomas Hancock obteve patente para a aplicação do material em pavimentos. Posteriormente, em 1844, E. E. Cassell registrou uma nova patente que combinava asfalto e borracha natural, enquanto em 1901 a empresa francesa *Société du Pavage en Asphalt Caoutchouté* realizou as primeiras aplicações práticas conhecidas (Williams *et al.*, 2015).

A formulação moderna do asfalto-borracha, baseada no reaproveitamento de pneus moídos, teve origem nos Estados Unidos, na década de 1960. O engenheiro Charles H. McDonald, atuando no *Bureau of Public Roads* (atual *Federal Highway Administration* – FHWA), desenvolveu misturas asfálticas

contendo pó de borracha de pneu para recuperação de pavimentos e selagem de trincas. O produto, denominado *Stress Absorbing Membrane Interlayer* (SAMI), obteve resultados satisfatórios em projetos-piloto no estado do Arizona, marcando o início da aplicação sistemática da borracha em revestimentos asfálticos (Heitzman et al., 1992; FHWA, 2014).

Durante as décadas seguintes, o uso da borracha em misturas asfálticas expandiu-se para outros estados norte-americanos, como Califórnia, Flórida e Texas, alcançando também a Europa e a África do Sul. O governo dos Estados Unidos fortaleceu essa prática com o *Intermodal Surface Transportation Efficiency Act* (ISTEA) de 1991, que incentivou financeiramente o emprego de materiais reciclados em obras viárias. Desde então, o asfalto-borracha passou a ser reconhecido como um ligante modificado de alto desempenho, capaz de aumentar a durabilidade e reduzir a espessura das camadas asfálticas (NZTA, 2016; Presti, 2013).

Nos anos 2000, a tecnologia foi consolidada em diversos países, com adaptações às condições locais de clima e tráfego. Pesquisas conduzidas no Canadá, Austrália e Espanha demonstraram que o uso do asfalto-borracha contribui para redução de ruído, maior resistência à fadiga e diminuição de trincas térmicas, consolidando-o como tecnologia de pavimentação sustentável (Sidhu, 2020; Sierra-Carrillo et al., 2022).

No Brasil, os estudos pioneiros surgiram no final da década de 1990, com destaque para as pesquisas de Leite (1999) e Oda (2000) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que avaliaram o desempenho de misturas asfálticas contendo borracha moída de pneus. O primeiro trecho experimental foi executado em 2001, na BR-116 (Rio Grande do Sul), apresentando desempenho superior em relação ao revestimento convencional, especialmente quanto ao retardamento de trincas e à maior vida útil (Leite, 1999; Oda, 2001; Specht, 2003).

Nos anos seguintes, a aplicação expandiu-se por meio de parcerias entre universidades, empresas privadas e órgãos rodoviários. Segundo Castañeda-Robles et al. (2024), até 2020 já haviam sido pavimentados mais de 12,8 mil km de rodovias brasileiras com misturas contendo borracha reciclada, equivalentes a aproximadamente 12,8 milhões de pneus reaproveitados. Estados como Paraná, São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul desenvolveram normas próprias e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) passou a adotar metodologias padronizadas de produção, como o *Field Blend* e o *Terminal Blend* (Specht et al, 2003).

A difusão do asfalto-borracha no país foi acompanhada por uma crescente preocupação com os aspectos ambientais e econômicos. Além de oferecer um destino sustentável para milhões de pneus descartados, a tecnologia apresentou melhoria significativa no desempenho reológico e na durabilidade dos pavimentos, com destaque para regiões de altas temperaturas, onde o material apresenta menor susceptibilidade térmica (Wang et al., 2017; Riekstins et al., 2022).

Atualmente, o Brasil está entre os países que mais aplicam o asfalto-borracha em larga escala, especialmente em rodovias de alto volume de tráfego e obras urbanas de reabilitação. O sucesso da tecnologia se deve não apenas ao seu desempenho mecânico, mas também à contribuição ambiental, uma vez que cada quilômetro de pavimento executado pode reutilizar até mil pneus (Jin *et al.*, 2025). Dessa forma, o asfalto-borracha consolidou-se como uma solução de engenharia ambientalmente responsável, em sintonia com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e da economia circular.

2.1.3. Processos de Incorporação

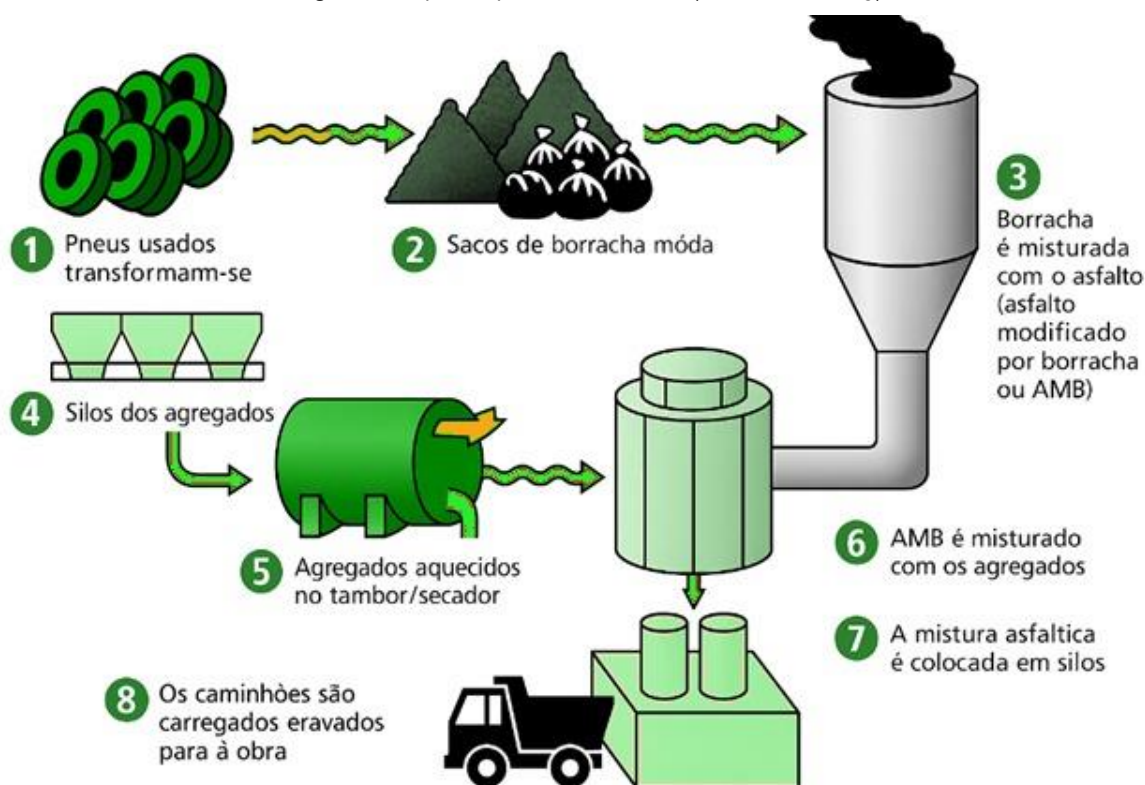
A incorporação da borracha moída de pneus ao cimento asfáltico de petróleo (CAP) é uma das etapas mais relevantes na produção do asfalto-borracha, pois determina as propriedades físico-químicas e reológicas do material final. O método de incorporação define o grau de interação entre o ligante e as partículas de borracha, influenciando diretamente a viscosidade, a resistência à fadiga, a deformação permanente e o desempenho em campo (Specht *et al.*, 2003; Adnan *et al.*, 2023).

Segundo Faxina (2002), a modificação do ligante pode ocorrer por três métodos principais: processo úmido (*wet process*), processo seco (*dry process*) e processos híbridos ou de quarta geração, que englobam as tecnologias *Reacted and Activated Rubber* (RAR) e pellets encapsulados.

O processo úmido é o método mais tradicional e empregado na produção do asfalto-borracha (Figura 2), tanto no Brasil quanto em outros países. Nesse sistema, o pó de borracha é adicionado diretamente ao ligante betuminoso, antes da mistura com os agregados, promovendo uma modificação físico-química controlada. A reação ocorre a temperaturas entre 170 °C e 220 °C, sob agitação contínua, por 30 a 60 minutos, permitindo o inchamento e a despolimerização parcial das partículas, devido à absorção dos óleos aromáticos do CAP (Wang *et al.*, 2017; Giovani *et al.*, 2021).

Musselman *et al.* (2024) descrevem que o processo úmido (Figura 2) é realizado em tanques herméticos, equipados com palhetas horizontais giratórias, para garantir a homogeneização. A ASTM D6114 recomenda a adição mínima de 15 % de borracha em massa do ligante, podendo chegar a 25 %, com granulometria inferior a 2 mm. O resultado é um ligante mais viscoso, com melhor elasticidade, maior ponto de amolecimento e maior resistência ao envelhecimento (Liu *et al.*, 2025).

Figura 2: Etapas do processo via úmida (*Terminal Blending*)



Fonte: Adaptado de Kelm, *et al.*, (2025)

No Brasil, esse processo é regulamentado pela DNIT 111/2009, que descreve o asfalto-borracha do tipo “*Terminal Blending*”, ou seja, produzido em plantas industriais e posteriormente transportado ao local de aplicação. O material obtido é estocável e homogêneo, e a mistura é mantida sob altas temperaturas e cisalhamento (Bertollo *et al.*, 2000; DNIT 111/2009-EM).

Há também o método “*Field Blending*” (também referido como *continuous blending*), em que o ligante modificado é produzido com equipamento misturador na própria obra e deve ser aplicado imediatamente, devido à sua instabilidade, não sendo adequado para estocagem (Bernucci *et al.*, 2022). O processo úmido é indicado para obras de alto desempenho, como rodovias de tráfego intenso, camadas de ligação, selagem de trincas e tratamentos superficiais (Liu *et al.*, 2025). Além dos benefícios mecânicos, o método úmido permite o reaproveitamento de até 2 000 pneus inservíveis por milha pavimentada, demonstrando seu potencial ambiental (Barreto *et al.*, 2024).

No processo seco, a borracha granulada é incorporada diretamente à mistura asfáltica, substituindo parte da fração miúda dos agregados. Diferentemente do método úmido, não há reação química significativa entre o CAP e a borracha, predominando uma interação mecânica. As temperaturas de mistura variam entre 160 °C e 180 °C, e a borracha empregada possui granulometria entre 1,6 e 6,4 mm (Faxina, 2002; Rodrigues, 2021).

Entre as principais vantagens do processo seco destacam-se:

- Praticidade operacional, por não exigir reatores ou tanques de digestão;
- Baixo custo de implantação;
- Menor consumo energético e menor emissão de gases;
- Facilidade de aplicação em usinas convencionais.

A ASTM D6114 classifica esse método como asfalto-borracha de 1ª geração, no qual a borracha substitui até 3 % da massa total de agregados (Bertollo, 2000). A quantidade total de borracha pode ser duas a quatro vezes maior que no processo úmido, o que confere maior absorção de impacto, mas menor uniformidade (Faxina, 2002).

Estudos conduzidos por Oda e Fernandes Júnior (2001) e Silva (2018) demonstraram que misturas obtidas via seca apresentam melhor resistência à fadiga e à deformação permanente quando se utilizam partículas com granulometria inferior a 1 mm. Entretanto, resultados experimentais nos Estados Unidos (Volle, 2000) indicaram desempenho inferior em comparação às misturas convencionais, devido ao menor tempo de interação entre o CAP e a borracha (Van, 2000).

Apesar dessas limitações, o processo seco é valorizado pela simplicidade operacional, por dispensar equipamentos complexos e apresentar baixo custo de produção e menor consumo energético, o que o torna adequado a obras de médio porte e vias urbanas regionais (Souza *et al.*, 2021). Com o avanço tecnológico, surgiram as tecnologias híbridas ou de quarta geração, que unem as vantagens dos processos úmido e seco, reduzindo custos e simplificando a aplicação. Dentre essas inovações destacam-se a *Reacted and Activated Rubber* (RAR) e os pellets encapsulados (Nunes, 2017; Lopes, 2022).

A RAR é composta por ligante asfáltico convencional, granulado fino de borracha (passante na peneira nº 30) e estabilizantes minerais ativos (*Activated Mineral Binder Stabilizer – AMBS*). O material é pré-reagido e ativado quimicamente, o que permite sua adição direta ao CAP sem necessidade de digestão térmica (Souza *et al.*, 2021, Nunes, 2017). Essa tecnologia resulta em ligantes com maior estabilidade, melhor aderência e maior resistência à fadiga, podendo operar em temperaturas semelhantes às misturas convencionais (Wu *et al.*, 2012).

Já os pellets de borracha, conhecidos como asfaltos-borracha encapsulados, são pequenas pelotas sólidas obtidas a partir da mistura de borracha de pneu, polímeros SBS, cimento Portland, fíleres minerais e fibras, compactadas e resfriadas (Phoenix Industries, 2021). Esses materiais podem ser armazenados a temperatura ambiente e adicionados diretamente aos agregados durante a usinagem, reduzindo emissões de CO₂ e facilitando a logística (Maia *et al.*, 2023).

Segundo Lopes (2022), o uso de pellets e RAR proporciona melhor controle da dosagem de borracha, maior padronização do produto e redução de riscos operacionais, permitindo sua aplicação inclusive em usinas convencionais. Ensaios realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e no Laboratório de Infraestrutura Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília (INFRALAB) indicaram que misturas híbridas apresentam maior módulo dinâmico, melhor resistência à fadiga e menor deformação permanente em comparação às misturas tradicionais (Lopes, 2022; Nunes, 2017).

Assim, a evolução dos processos de incorporação da borracha reflete a busca por soluções técnicas mais sustentáveis, conforme discutido nos tópicos anteriores. A transição dos métodos convencionais para as tecnologias híbridas representa não apenas um aprimoramento operacional, mas também um avanço alinhado às políticas de sustentabilidade e economia circular da engenharia de pavimentos moderna.

2.1.4. Benefícios Estruturais e Funcionais do Asfalto e Borracha

A modificação do ligante asfáltico com borracha moída resulta em alterações reológicas expressivas, refletidas no aumento da viscosidade e da capacidade elástica do material. Estudos clássicos de Oda (2001) e Specht e Ceratti (2003) mostraram que a adição de 18 % a 22 % de borracha em massa do CAP promoveu um aumento médio de 40 % no ponto de amolecimento e uma redução superior a 30 % na penetração, indicando melhor resistência à deformação.

Esses resultados foram corroborados por Pilati (2008), que observou, por meio de ensaios reológicos dinâmicos, maior módulo complexo (G^*) e menor ângulo de fase (δ) em ligantes modificados, o que implica melhor resistência à trilha de roda. Segundo Faxina (2002), o comportamento viscoelástico do asfalto-borracha é resultado da interação físico-química entre os constituintes do CAP e a borracha, na qual há absorção de maltenos pela borracha e consequente inchamento das partículas.

Pesquisas realizadas por Lopes (2022) e Nunes (2017) também evidenciam que as misturas asfálticas modificadas com borracha apresentam melhor resposta mecânica sob carregamentos cíclicos, com maior módulo dinâmico, menor deformação acumulada e maior resistência à fadiga. Em ensaios realizados em laboratório, a autora observou que o uso de ligantes do tipo RAR e pellets proporcionou redução de até 35 % na deformação permanente em comparação ao CAP convencional.

Resultados semelhantes foram encontrados por Souza, Mata e Guedes (2021), que destacam a melhoria da estabilidade Marshall e o aumento da rigidez e da coesão interna das misturas, refletindo em maior durabilidade estrutural do pavimento. De forma complementar, estudos internacionais de Wu *et al.* (2012) demonstraram que o uso de ligantes ativados quimicamente (AMBS e RAR) confere maior

compatibilidade e estabilidade termodinâmica, favorecendo a resistência ao envelhecimento e a manutenção das propriedades elásticas ao longo do tempo.

Além disso, *Rubber Pavement Association* (RPA, 2021) em rodovias do Arizona, Texas e Paraná confirmam o retardamento do trincamento e da fadiga em até 50 %, bem como a redução da espessura de camadas asfálticas em cerca de 30 %, sem perda de desempenho estrutural. Esses resultados comprovam que o asfalto-borracha, quando corretamente formulado, aumenta a vida de serviço do pavimento e reduz custos de manutenção a longo prazo (Fang *et al.*, 2025).

Os benefícios funcionais do asfalto-borracha estão relacionados à melhoria das condições de rolamento, conforto, segurança e sustentabilidade ambiental. A borracha incorporada ao ligante contribui para aumentar a macrotextura e a resistência ao deslizamento, elevando a aderência pneu-pavimento, especialmente sob condições de chuva (Barreto *et al.*, 2024).

Segundo estudos de Oda e Fernandes Júnior (2001) e Leite (1999), pavimentos executados com asfalto-borracha apresentam coeficiente de atrito superior em até 20 % em relação a revestimentos convencionais. Além disso, em misturas abertas (*open graded*), há redução de ruído de tráfego entre 3 e 5 dB(A), conforme reportado por Presti (2013), o que melhora o conforto acústico em áreas urbanas.

Outro ganho funcional importante refere-se à redução da suscetibilidade térmica. Oda (2001) observou que ligantes com borracha mantêm desempenho satisfatório em temperaturas superiores a 70 °C, enquanto os convencionais tendem à plastificação. De acordo com Klinsky e Faria (2017), essa característica é especialmente vantajosa em regiões de clima semiárido, como o Nordeste brasileiro, onde as variações térmicas são acentuadas.

No contexto ambiental, o uso do asfalto-borracha proporciona valorização de resíduos e mitigação de impactos ambientais. Estima-se que cada quilômetro de pavimento com ligante borracha reutiliza entre 800 e 1000 pneus inservíveis, evitando o acúmulo em aterros e reduzindo a emissão de gases de efeito estufa associados à queima irregular desses resíduos (RECICLANIP, 2018; ANIP, 2024).

Lopes (2022) reforça que o emprego de tecnologias híbridas, como a RAR e os pellets encapsulados, representa um avanço funcional ao reduzir emissões gasosas e o consumo energético, além de garantir maior estabilidade de produção e aplicação, com desempenho mecânico equivalente ou superior ao das misturas convencionais.

Por fim, estudos de campo realizados em trechos monitorados do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER/PR) indicaram menor incidência de defeitos superficiais, maior regularidade longitudinal e redução de ruído de rolamento, confirmando o desempenho funcional superior do asfalto-borracha em operação (RPA, 2021).

Em síntese, o uso da borracha moída de pneus em ligantes asfálticos confere ao pavimento:

- Maior resistência à deformação permanente e à fadiga;

- Aumento da elasticidade e da durabilidade do revestimento;
- Redução da suscetibilidade térmica e do envelhecimento oxidativo;
- Melhor aderência pneu-pista e redução de ruído;
- Aproveitamento sustentável de resíduos sólidos e menor impacto ambiental.

Assim, o asfalto-borracha se consolida como solução técnica e ambientalmente eficiente, integrando desempenho mecânico e funcional à política de destinação sustentável de pneus inservíveis, conforme discutido nos tópicos anteriores sobre logística reversa e economia circular.

2.1.5. Desafios Técnicos e Limitações da Aplicação do Asfalto Borracha

Apesar dos comprovados benefícios estruturais e funcionais, a tecnologia do asfalto-borracha ainda enfrenta barreiras técnicas, econômicas e operacionais que dificultam sua aplicação no Brasil e em diversos países. Esses desafios decorrem principalmente das características intrínsecas do ligante modificado, das exigências específicas de produção e controle, e das limitações normativas e logísticas associadas à cadeia de fornecimento (Faxina, 2002; Nunes, 2017; Lopes, 2022). De modo geral, as dificuldades mais recorrentes se concentram em três eixos:

- Desafios de formulação e estabilidade reológica do ligante;
- Restrições operacionais na usinagem, transporte e aplicação em campo;
- Custos e limitações institucionais que impactam sua adoção em larga escala.

O principal desafio técnico associado ao asfalto-borracha é garantir a estabilidade físico-química da mistura entre o cimento asfáltico e as partículas de borracha. De acordo com Faxina (2002), as diferenças de polaridade, densidade e viscosidade entre os componentes dificultam a homogeneização e favorecem a segregação durante o armazenamento, especialmente em altas temperaturas.

Essa instabilidade pode causar variação nas propriedades reológicas do ligante, prejudicando a uniformidade do produto. Specht e Ceratti (2003) relatam que, em temperaturas superiores a 180 °C e períodos prolongados de estocagem, ocorre sedimentação das partículas de borracha e separação de fases, reduzindo o teor efetivo de modificação do CAP.

O controle da digestão da borracha também representa uma variável crítica. Quando o tempo ou a temperatura de reação são inadequados, podem ocorrer inchaço insuficiente ou degradação excessiva das partículas, afetando diretamente a viscosidade e a elasticidade do material (Pilati, 2008). Em alguns casos, a degradação térmica libera compostos voláteis, como enxofre e tolueno, que comprometem a estabilidade química do ligante.

De acordo com Lopes (2022), outro fator limitante é a compatibilidade entre o tipo de borracha e o CAP utilizado. Asfalto de base parafínica, comum em algumas refinarias brasileiras, apresenta menor

afinidade química com borracha de origem natural, exigindo o uso de aditivos compatibilizantes ou modificadores auxiliares, como o ácido polifosfórico (PPA) e polímeros SBS, para manter o desempenho esperado.

Em resposta a esses desafios, surgiram tecnologias de quarta geração, como o RAR e os pellets encapsulados, que aumentam a estabilidade do produto e simplificam o controle de produção. Contudo, seu custo ainda é superior ao dos métodos convencionais (Lopes, 2022; Maia, 2023).

No aspecto operacional, o asfalto-borracha exige equipamentos específicos de mistura e controle térmico, tanto na fase de produção do ligante quanto na usinagem e aplicação. Conforme Bernucci *et al.* (2022), no processo úmido o ligante modificado pode ser estocável (*terminal blending*) ou não estocável (*continuous blending/just in time*), sendo que a alternativa estocável demanda processamento em altas temperaturas com agitação em alto cisalhamento, enquanto a produção não estocável ocorre com equipamentos acoplados à usina/obra e requer aplicação em curto prazo devido à instabilidade do material. Essa característica impõe restrições logísticas significativas, especialmente em regiões afastadas de centros produtores. O transporte do material quente requer veículos termicamente isolados e prazos curtos de entrega, o que encarece a operação e limita o alcance da tecnologia a determinadas regiões (Fang *et al.*, 2025).

Durante a aplicação, o alto teor de viscosidade do asfalto-borracha impõe cuidados adicionais na compactação e na regulagem das vibrações dos rolos. Oda (2000) e Faxina (2002) observam que o tempo de usinagem é mais curto, exigindo sincronização entre produção e aplicação, sob pena de perda de trabalhabilidade e segregação da mistura.

Além disso, as emissões gasosas e odor durante a digestão da borracha são aspectos ambientais e ocupacionais relevantes. A volatilização de compostos orgânicos e enxofre pode gerar desconforto e requer sistemas de exaustão e filtragem adequados (Nunes, 2017).

O controle da uniformidade de granulometria da borracha também é um fator determinante. Partículas com dimensões superiores a 2 mm comprometem a homogeneidade do ligante e favorecem o entupimento de bicos de aplicação. Por essa razão, a norma DNIT 111/2009-EM recomenda o uso de borracha com granulometria controlada e teor máximo de 0,2 % de impurezas metálicas.

Apesar do avanço técnico, o custo inicial de produção do asfalto-borracha ainda é mais elevado do que o das misturas convencionais. Estimativas da ANIP (2024) indicam um acréscimo médio de 20 % a 35 % no custo do ligante, principalmente em função da necessidade de infraestrutura especializada e da logística de coleta e trituração de pneus.

Contudo, diversos estudos de custo de ciclo de vida demonstram que, mesmo com investimento inicial maior, o asfalto-borracha reduz em até 30 % os custos de manutenção ao longo da vida útil do pavimento, devido à maior durabilidade e à menor frequência de intervenções (Labafi *et al.*, 2025).

Outro desafio está na ausência de padronização nacional abrangente. Embora o DNIT 111/2009-EM estabeleça parâmetros para o ligante asfalto-borracha, ainda há lacunas normativas relacionadas a metodologias de ensaio, especificações de mistura e controle de desempenho em campo. Isso resulta em inconsistências entre projetos e resultados práticos, dificultando a disseminação da tecnologia.

Além disso, a falta de capacitação técnica de equipes de projeto, fiscalização e operação limita a adoção em larga escala. Como ressaltam Nunes (2017) e Lopes (2022), o domínio dos parâmetros de produção e aplicação é essencial para garantir a performance esperada, sendo recomendável a criação de protocolos de treinamento e certificação técnica.

Apesar das restrições, o avanço de tecnologias híbridas e novas abordagens reológicas vêm minimizando muitas das limitações técnicas. Pesquisas recentes com asfaltos RAR e pellets demonstram desempenho comparável aos processos úmidos tradicionais, com maior estabilidade e praticidade operacional (Maia *et al.*, 2023).

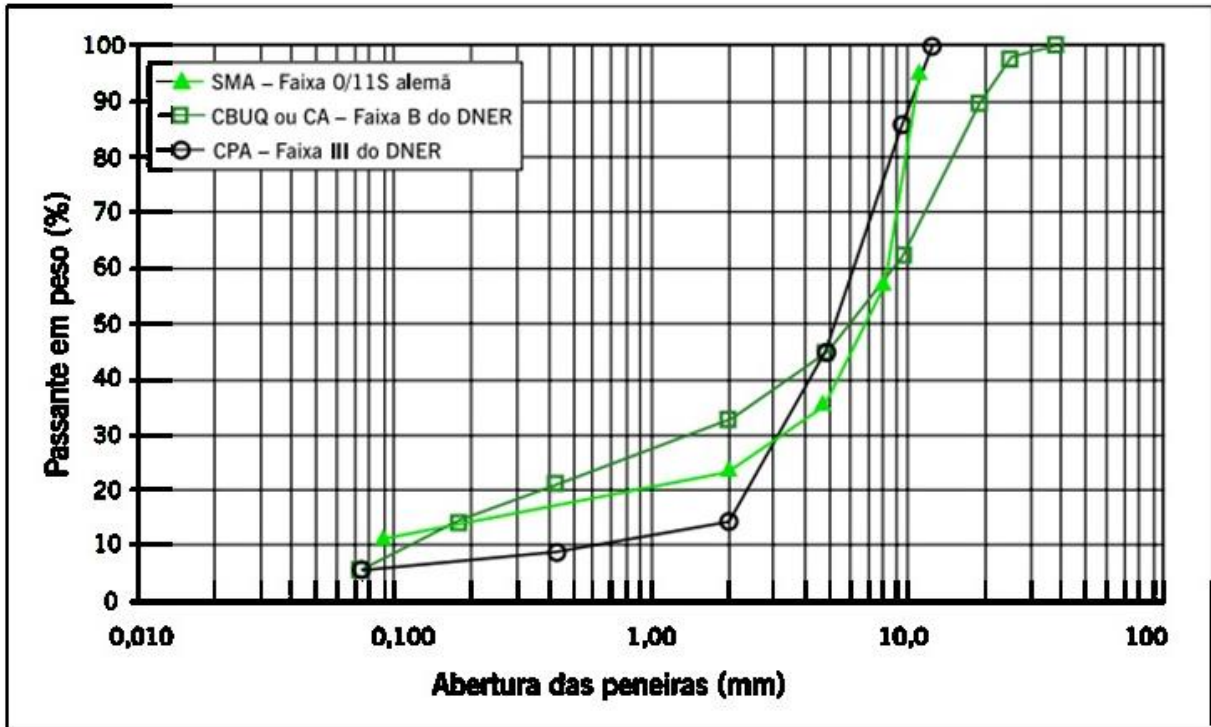
A integração entre setor produtivo, universidades e órgãos públicos é apontada como caminho essencial para ampliar o uso do asfalto-borracha, especialmente dentro das políticas de economia circular e pavimentação sustentável (Lopes, 2022). O estabelecimento de normas atualizadas, incentivos fiscais e programas de fomento tende a consolidar essa tecnologia como prática recorrente na infraestrutura rodoviária brasileira.

2.2. Granulometria e Estrutura Interna das Misturas Asfálticas

A granulometria representa a distribuição das partículas de agregados em diferentes tamanhos dentro de uma mistura asfáltica, sendo um dos parâmetros mais relevantes para o controle da estabilidade volumétrica, da trabalhabilidade e do desempenho mecânico do pavimento. De acordo com o DNIT 031/2006 – ES, a curva granulométrica define a proporção relativa entre as frações graúda, média e fina do agregado mineral, que, em conjunto com o teor de ligante, determina a compactidade e a resistência da mistura. Esse controle é essencial para assegurar que a mistura atenda aos requisitos de durabilidade e resistência ao tráfego.

Segundo Souza (2023), a adequada composição granulométrica é o que garante a interconexão entre partículas, conferindo estrutura estável e evitando segregação durante o espalhamento e compactação da mistura. A uniformidade da curva de distribuição (Figura 3) influencia diretamente o volume de vazios, o teor de ligante necessário e o comportamento sob solicitações de tráfego, de modo que variações excessivas podem resultar em redução de durabilidade e fissuração prematura do revestimento.

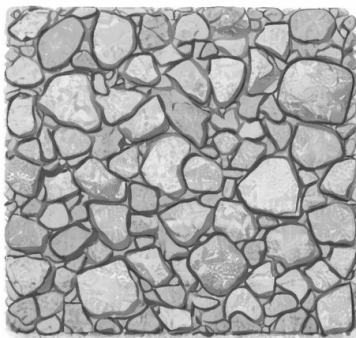
figura 3: Curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas a quente



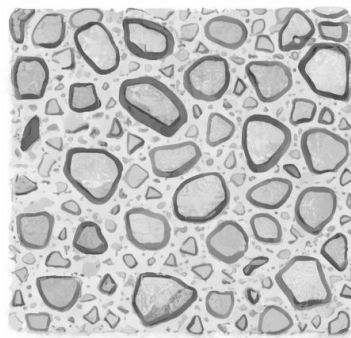
Fonte: Adaptado de Klinky *et al.*, (2021)

De forma conceitual, a curva granulométrica pode ser classificada em três principais tipos: densa (*dense-graded*), aberta (*open-graded*) e descontínua (*gap-graded*) como mostra a Figura 4. As misturas densas apresentam distribuição contínua de partículas e, por isso, promovem maior estabilidade e menor permeabilidade, sendo aplicadas em camadas estruturais e de rolamento (Liu *et al.*, 2025). Já as misturas abertas possuem predominância de agregados graúdos e alto teor de vazios, favorecendo a drenagem e a redução de ruído, mas exigindo controle rigoroso do escoamento de ligante (Zhao *et al.*, 2024). Por sua vez, as granulometrias descontínuas (com ausência de frações intermediárias) permitem maior espessura de filme asfáltico, melhorando a flexibilidade e a resistência à fadiga, especialmente quando combinadas a ligantes modificados.

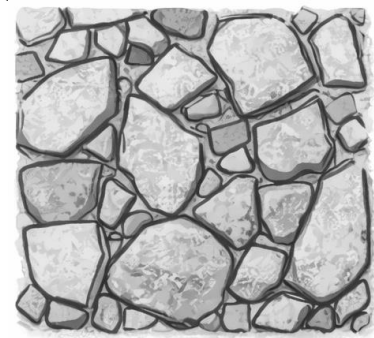
Figura 4: Representação das três principais classificações granulométricas



(a) Densa



(b) Aberta



(c) Descontínua

Fonte: Adaptado de Leite, (1999)

A influência da granulometria na resistência mecânica da mistura foi comprovada por Leandro *et al.* (2021), ao avaliarem misturas densas com diferentes tipos de agregado e ao utilizarem o método *Bailey* para garantir adequado empacotamento da fração graúda. Os autores observaram que a morfologia angular e a textura superficial rugosa dos agregados, associadas a uma curva bem graduada, aumentam o intertravamento interno e reduzem a deformação permanente sob tráfego pesado. Esse comportamento se deve ao chamado “travamento do esqueleto pétreo”, fundamental para a estabilidade da mistura, sobretudo em regiões de clima quente.

Na mesma linha, Guimarães *et al.* (2022) destacaram que a granulometria de referência é um fator de controle contra o afundamento em trilha de roda (ATR), uma das patologias mais recorrentes em pavimentos asfálticos brasileiros. Em seu estudo comparando metodologias de determinação de composição granulométrica (*Bailey*, Faixa de Agregados Dominantes (FAD) e *Marshall*), concluiu-se que as misturas projetadas com base em uma estrutura mineral graúda e intertravada apresentaram melhores resultados de *Flow Number* (FN) e resistência à densificação pelo tráfego. Os autores reforçam que a escolha da curva granulométrica deve considerar o tipo de solicitação e as condições climáticas, uma vez que regiões tropicais tendem a intensificar o efeito da deformação permanente.

Outro aspecto relevante refere-se à influência da fração fina sobre o teor de ligante e o comportamento volumétrico. Ildelfonso *et al.* (2025) analisaram misturas densas dentro da Faixa C do DNIT 031/2024 – ES, variando o percentual de agregados finos, e constataram que o excesso de material passante na peneira n° 200 aumenta a deformabilidade da mistura e eleva o consumo de ligante, reduzindo a resistência à tração e a estabilidade *Marshall*. Assim, o equilíbrio entre as frações finas e graúdas é determinante para o desempenho do pavimento, sendo importante manter o teor de finos dentro dos limites normativos.

Sob a ótica estatística, Souza (2023) identificou, em um estudo de campo realizado em rodovia cearense, que as peneiras de menor abertura (n° 40, 80 e 200) são as que apresentam maior variabilidade de controle, indicando a necessidade de ajustes contínuos na usina durante a execução das camadas asfálticas. Essa variabilidade reflete diretamente na uniformidade do revestimento e, conseqüentemente, em sua durabilidade.

Estudos apontam que a granulometria não deve ser tratada apenas como um parâmetro de controle físico, mas como uma variável de projeto de desempenho. Zhao *et al.* (2024) ressaltam que o método *Bailey* permite compreender a relação entre as proporções das frações graúdas e finas e a capacidade de dissipar tensões cisalhantes, sendo um avanço significativo frente aos métodos empíricos tradicionais. Já o método FAD, conforme Guimarães *et al.* (2022), fundamenta-se no conceito de porosidade efetiva, considerando a interação entre o esqueleto pétreo e o ligante asfáltico para prever o comportamento da mistura sob carregamentos repetitivos.

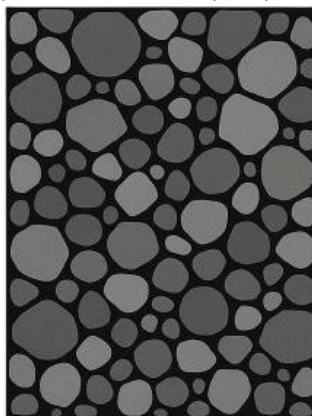
Dessa forma, observa-se que o controle e o entendimento da granulometria são fundamentais não apenas para o atendimento às especificações do DNIT, mas também para o projeto de misturas asfálticas duráveis e resistentes. O desempenho adequado é alcançado quando há equilíbrio entre intertravamento, volume de vazios e teor de ligante, garantindo que o pavimento suporte as condições de tráfego e clima ao longo de sua vida útil.

A seleção adequada da curva granulométrica é determinante para o desempenho mecânico e funcional das misturas asfálticas. O tipo de graduação adotada define o nível de intertravamento entre agregados, o teor de ligante necessário, o volume de vazios, a resistência à deformação permanente, a resistência à fadiga e a durabilidade da camada de rolamento. No contexto brasileiro, as principais categorias de granulometrias utilizadas em misturas asfálticas — densas e descontínuas — estão definidas na Especificação de Serviço DNIT 031/2024 – ES, que estabelece faixas granulométricas (A a F) para misturas usinadas a quente, conforme o tamanho máximo nominal do agregado. Complementarmente, a AASHTO M323 (2021) e a ASTM D3515 (2018) padronizam curvas granulométricas para o sistema *Superpave*, incluindo a zona de restrição (*restricted zone*) que orienta o empacotamento adequado dos agregados.

2.2.1. Misturas densas (*dense-graded*)

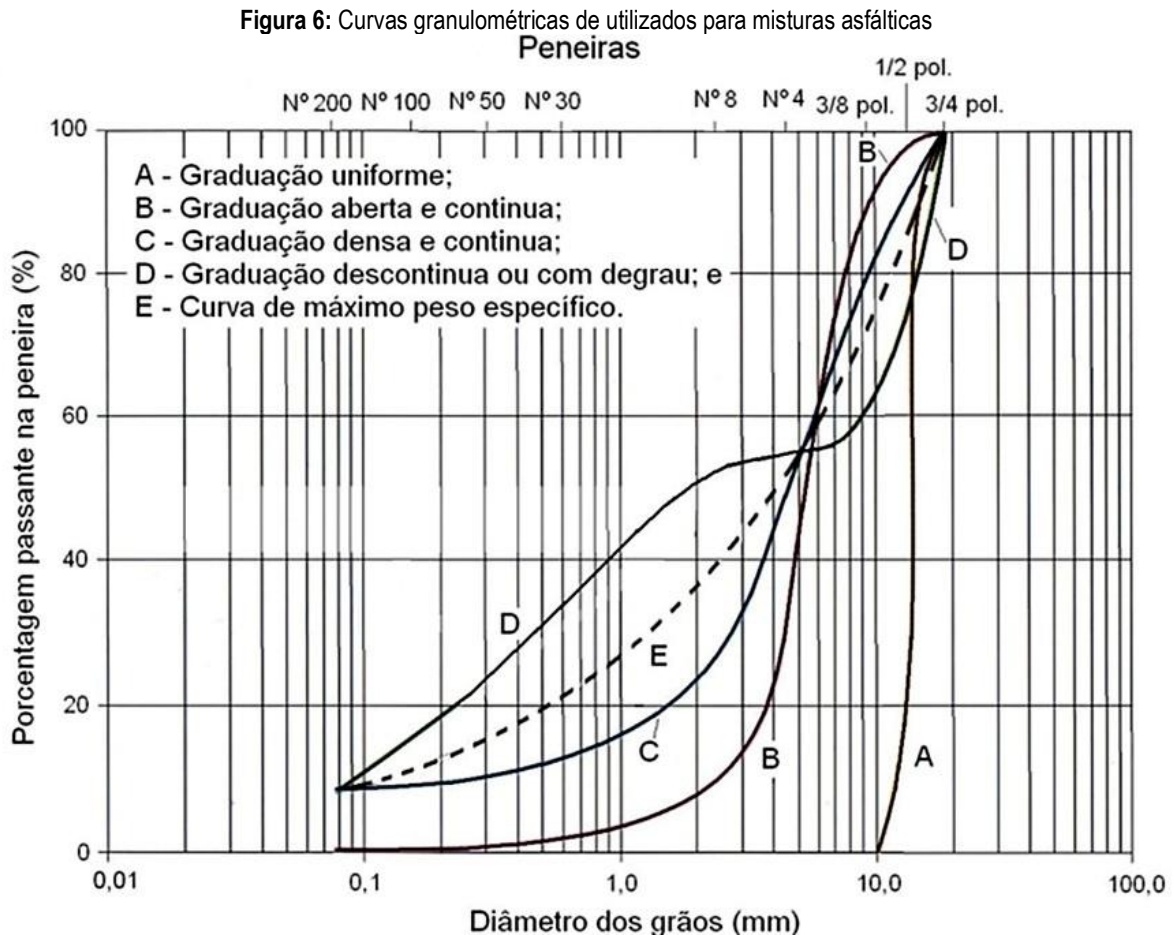
As misturas densas, conhecidas também como Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), apresentam distribuição contínua de partículas minerais, com presença equilibrada de agregados graúdos, miúdos e filer (Figura 5) Essa estrutura garante baixa permeabilidade, alta estabilidade volumétrica e boa resistência ao cisalhamento, características que as tornam ideais para camadas de rolamento e base submetidas a tráfego intenso.

Figura 5: Representação das três principais classificações



Fonte: Autoria própria (2026)

De acordo com o DNIT 031/2024–ES, as misturas densas se enquadram nas faixas granulométricas A, B e C (Figura 6) variando conforme o tamanho máximo nominal do agregado (19,1 mm, 12,5 mm ou 9,5 mm, respectivamente), e devem apresentar teor de vazios entre 3% e 5% após a compactação *Marshall*, conforme DNIT 112/2009 – ES.



Fonte: Adaptado de Guimarães *et al.*, (2022)

Estudos experimentais reforçam que o desempenho das misturas densas está diretamente associado à morfologia dos agregados e à adequação da curva granulométrica. Segundo *Klinksy et al.* (2021), misturas compostas por agregados graúdos angulares e de textura rugosa, quando bem graduadas, apresentam maior resistência à deformação permanente, especialmente em regiões de clima quente. Os autores observaram, por meio de ensaios de afundamento em trilha de roda (LCPC), que a forma cúbica dos agregados e a adequada distribuição entre as frações graúdas e finas são fatores determinantes para a estabilidade mecânica.

Conforme *Ildonso et al.* (2025), em misturas densas dentro da faixa C do DNIT, o controle da fração fina é essencial: o excesso de material passante na peneira nº 200 (0,075 mm) eleva o consumo

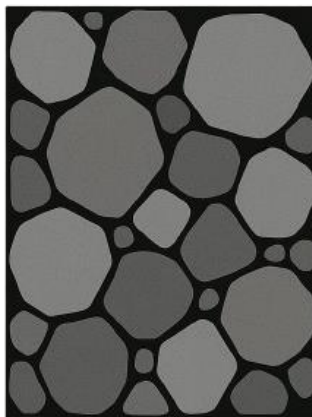
de ligante, reduz a resistência à tração e aumenta a suscetibilidade à deformação. Já a deficiência de finos compromete a coesão e favorece a segregação durante a compactação. Assim, é fundamental manter o equilíbrio granulométrico previsto nas normas nacionais e internacionais, ajustando o teor de asfalto e a temperatura de usinagem conforme o método de dosagem adotado.

Do ponto de vista internacional, a AASHTO M323 orienta que a curva granulométrica de uma mistura densa deve situar-se abaixo da zona de restrição *Superpave*, garantindo adequada interligação das partículas e reduzindo o risco de drenagem do ligante. Essa configuração resulta em maior estabilidade e módulo dinâmico, como observado em estudos de Guimarães *et al.* (2022), que verificaram correlação direta entre o *Flow Number* (FN) e o nível de intertravamento obtido em misturas densas otimizadas pelo método *Bailey*.

2.2.2. Misturas descontínuas

As misturas descontínuas, caracterizam-se pela ausência de agregados intermediários entre as frações graúdas e finas, resultando em uma curva granulométrica com “lacunas” na distribuição (Figura 7). Essa configuração promove a formação de um esqueleto pétreo estruturado, onde os agregados graúdos ficam em contato direto, conferindo alta resistência ao cisalhamento e maior espessura de filme de ligante, o que melhora a durabilidade e a resistência à fadiga.

Figura 7: Representação ilustrativa da Mistura Descontínua



Fonte: Autoria própria, (2026)

No Brasil, esse tipo de mistura tem sido utilizado em estudos envolvendo asfalto-borracha e ligantes modificados, devido à sua capacidade de acomodar maiores teores de ligante sem ocorrência de escoamento (*drain-down*). Nunes (2017) e Lopes (2022) apontam que as misturas descontínuas são especialmente eficazes em revestimentos de alto desempenho, pois proporcionam maior flexibilidade e resistência a trincas por fadiga, além de apresentarem melhor resposta viscoelástica sob cargas

repetidas. Essas misturas geralmente seguem a faixa D ou a faixa E da DNIT 031/2024 – ES, adaptadas para teores de ligante superiores a 6%.

Segundo Guimarães *et al.* (2022), quando projetadas pelo método *Bailey* ou pela Faixa de Agregados Dominantes (FAD), as misturas descontínuas apresentam desempenho superior em ensaios de *Flow Number* e Dano por Umidade Induzida (DUI), confirmando sua adequação para regiões de tráfego pesado e altas temperaturas. O estudo demonstrou que o uso de um esqueleto graúdo com maior porosidade efetiva permite dissipação eficiente das tensões cisalhantes, retardando o surgimento do afundamento em trilha de roda.

A AASHTO M323 também reconhece o potencial das misturas *gap-graded* em aplicações de alto desempenho, assim como o *Stone Matrix Asphalt* (SMA). Nessas configurações, os vazios entre os agregados graúdos são preenchidos por um ligante de alta viscosidade combinado a filer mineral, produzindo uma mistura altamente resistente à deformação permanente e menos suscetível ao envelhecimento oxidativo. Klinksy *et al.* (2021) destacam que esse comportamento é atribuído ao intenso intertravamento entre partículas graúdas, que garante a estabilidade da camada mesmo sob elevadas temperaturas de operação.

Souza (2023) acrescenta que, em obras rodoviárias reais, a aplicação de misturas descontínuas requer controle rigoroso do percentual passante nas peneiras críticas, especialmente entre 4,75 mm e 2,0 mm, pois pequenas variações podem afetar a textura e o comportamento de compactação em campo. A manutenção da uniformidade ao longo da produção é, portanto, fundamental para garantir o desempenho previsto em projeto.

Em termos gerais, as misturas densas se destacam pela estabilidade estrutural e menor permeabilidade, sendo aplicadas em camadas de rolamento convencionais. Já as misturas descontínuas são preferidas em pavimentos de alto desempenho, com ligantes modificados, pois apresentam melhor resposta à fadiga, menor deformação permanente e maior espessura de filme de ligante. Ambas as tipologias, quando corretamente dosadas segundo as normas DNIT 031/2024, DNIT 112/2009-ES e AASHTO M323, garantem comportamento satisfatório frente às solicitações de tráfego e às condições climáticas brasileiras.

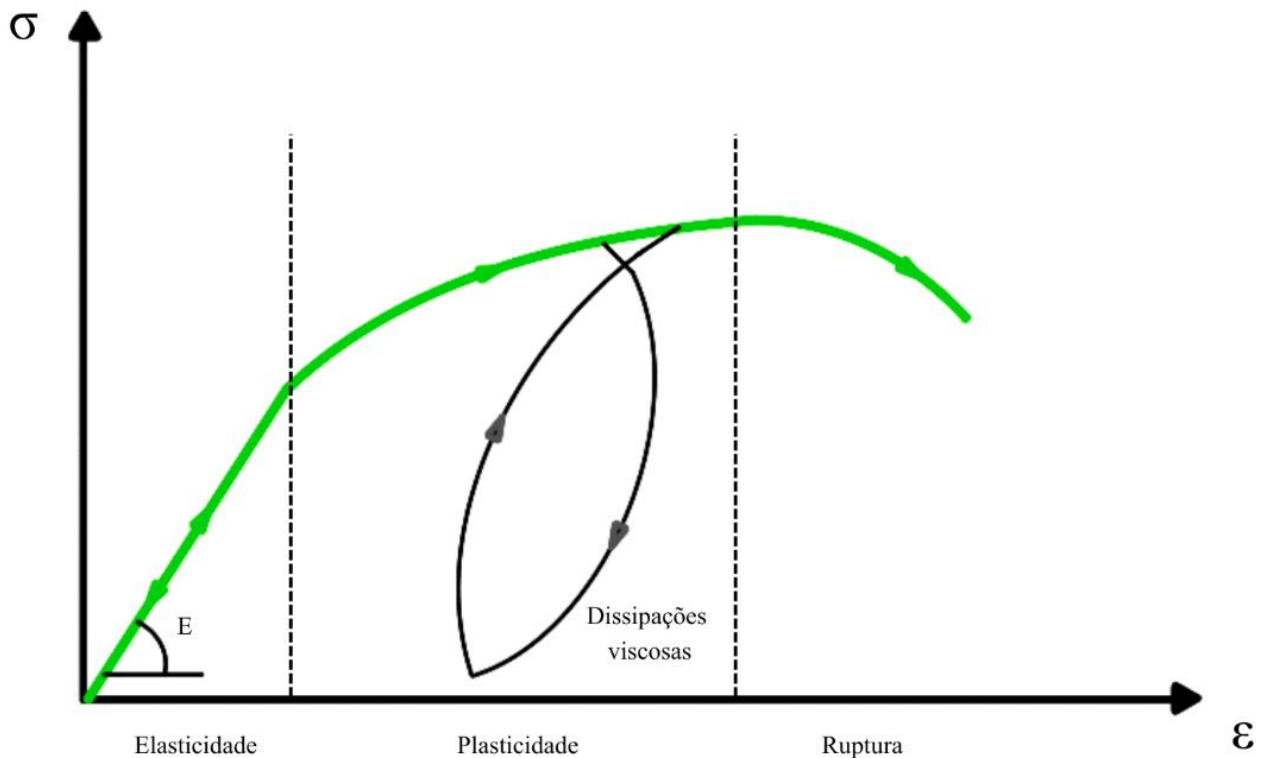
2.3. Viscoelasticidade dos Materiais Asfálticos

Materiais podem apresentar respostas mecânicas distintas, variando desde o comportamento elástico (linear ou não linear) até regimes viscoelásticos mais complexos. No caso elástico linear, a deformação é proporcional à tensão aplicada, sendo essa relação descrita pela lei de Hooke ($E = \sigma/\varepsilon$). Já no elástico não linear, a proporcionalidade não se mantém ao longo de todo o carregamento; ainda assim, em ambos os casos, a tensão σ depende apenas da deformação instantânea ε . Por isso, o trajeto

no diagrama tensão–deformação durante o carregamento coincide com o percurso de retorno no descarregamento, sem formação de histerese (Figura 8) (Jin et al., 2025).

Em contraste, materiais viscoelásticos exibem resposta influenciada pelo tempo e pela taxa de aplicação da carga, de modo que a relação tensão–deformação passa a incorporar efeitos viscosos (Figura 8). Nessa descrição, a constante associada ao escoamento é o coeficiente de viscosidade η , cuja dimensão pode ser interpretada como tensão multiplicada pelo tempo. Quando a relação constitutiva não segue proporcionalidade linear, o comportamento é classificado como não newtoniano (QUEIROZ, 2023). Em termos físicos, esses materiais combinam simultaneamente componentes elásticas e viscosas, podendo, em determinadas condições, aproximar-se do comportamento de um fluido newtoniano (Almeida, 2019).

Figura 8: Diagrama de Tensão x Deformação



Fonte: Adaptado de Babadopulos, (2014)

O comportamento viscoelástico costuma ser descrito por dois processos principais: fluência (*creep*) e relaxação. Na fluência, quando o material é submetido a uma tensão longitudinal constante (σ), a deformação aumenta gradualmente com o tempo. Já na relaxação ocorre o inverso: mantendo-se uma deformação longitudinal constante (ϵ), a tensão necessária para sustentar essa deformação decresce progressivamente, caracterizando o alívio de tensões ao longo do tempo (Queiroz, 2023).

Um aspecto central desses materiais é a dependência do histórico de carregamentos. Ou seja, a resposta mecânica não é determinada apenas pelo estado instantâneo de tensão/deformação, mas também pelo conjunto de solicitações aplicadas anteriormente. Essa dependência confere um efeito de memória ao material, frequentemente apontado como uma das marcas do comportamento viscoelástico (Kim, 2009). Por essa razão, a resposta é fortemente influenciada tanto pelo tempo quanto pela taxa de aplicação da carga.

Do ponto de vista da modelagem, enquanto materiais elásticos podem ser representados por relações constitutivas algébricas, a viscoelasticidade linear requer uma formulação baseada em integrais de hereditariedade, também conhecidas como integrais de superposição de Boltzmann (Christensen, 1982), justamente por incorporar a influência temporal do carregamento. Desconsiderando efeitos de envelhecimento, essas expressões assumem a forma de integrais de convolução. Assim, para o caso uniaxial e sob condição isotérmica (temperatura constante), as relações tensão/deformação podem ser escritas por meio dessas integrais de convolução, conforme apresentado nas Equações (1) e (2).

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t - \tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \quad (2)$$

Onde:

$\sigma(t)$ e $\varepsilon(t)$ são a tensão e deformação no instante t , respectivamente;

$E(t)$ e $D(t)$ são o módulo de relaxação e a função fluência, respectivamente;

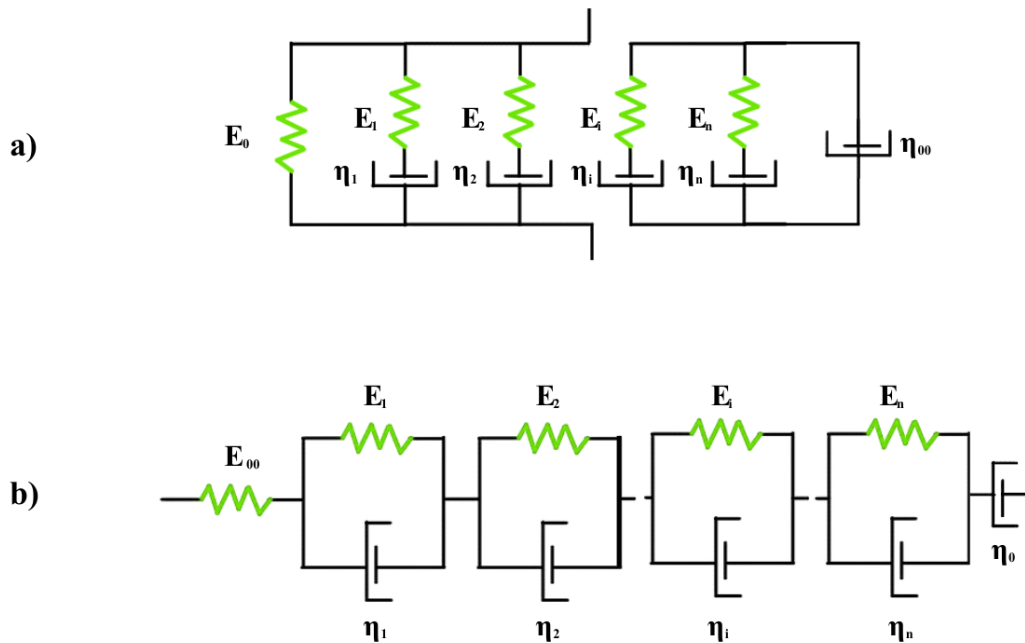
τ é uma variável de integração com dimensão de tempo.

Os materiais viscoelásticos são comumente caracterizados por duas funções-chave: o módulo de relaxação $E(t)$ e a função de fluência $D(t)$. Esses parâmetros permitem descrever a resposta mecânica do material sob diferentes históricos de carregamento, seja em termos de tensão ou de deformação. Diferentemente do módulo elástico clássico, $E(t)$ e $D(t)$ variam com o tempo de aplicação da carga, o que torna possível incorporar explicitamente efeitos temporais em simulações e análises numéricas (Beja, 2020). A obtenção dessas propriedades exige ensaios específicos, nos quais se impõe tensão ou deformação constante e se monitora, ao longo do tempo, a evolução da outra grandeza, permitindo a construção das curvas características do material (Ferry, 1980; Kim, 2009).

Para interpretar e representar esse comportamento, utilizam-se com frequência modelos mecânicos análogos formados por molas (componente elástico) e amortecedores (componente viscoso). No contexto de materiais asfálticos, esses arranjos ajudam a visualizar e ajustar o comportamento viscoelástico observado. Entre os modelos mais empregados está o Maxwell generalizado (também

chamado modelo de Wiechert), composto por vários ramos do tipo mola–amortecedor, organizados de modo a reproduzir a resposta dependente do tempo (Figura 9a). Outro arranjo clássico é o Voigt generalizado (ou modelo de Kelvin), construído com combinações mola–amortecedor dispostas em configuração alternativa (Figura 9b). Embora essas idealizações sejam úteis para reproduzir o comportamento macroscópico e ajustar dados experimentais, elas não necessariamente representam de forma direta os mecanismos moleculares que governam a resposta dos sólidos viscoelásticos (Beja, 2020).

Figura 9: a) Modelo de Maxwell generalizado (acima) e b) Modelo de Kelvin-Voigt generalizado (abaixo)



Fonte: adaptado de Di Benedetto e Corté (2005)

Na Figura 9, η representa a viscosidade e E o módulo de elasticidade do elemento considerado. Cada componente viscoelástico possui uma escala temporal característica associada à sua resposta. A razão η/E , com dimensão de tempo, é utilizada para definir parâmetros típicos dos modelos clássicos: no modelo de Maxwell, ela está ligada ao tempo de relaxação (ρ), enquanto no modelo de Kelvin–Voigt a mesma razão é associada ao tempo de retardação (τ). Além disso, E_0 (ou E_∞ , conforme a convenção adotada) corresponde ao módulo de equilíbrio em longo prazo. Já a fluência elástica de um elemento pode ser expressa como o inverso de sua rigidez, isto é, $D_i = 1/E_i$.

As expressões analíticas que conectam tensão e deformação obtidas a partir desses análogos mecânicos lineares são frequentemente formuladas na forma de séries de Prony. Essa representação é empregada para descrever a viscoelasticidade linear de sólidos, com destaque para materiais asfálticos, por oferecer boa capacidade de ajuste e ser numericamente conveniente, já que envolve combinações de termos exponenciais (Ferry, 1980; Christensen, 1982; Queiroz, 2023).

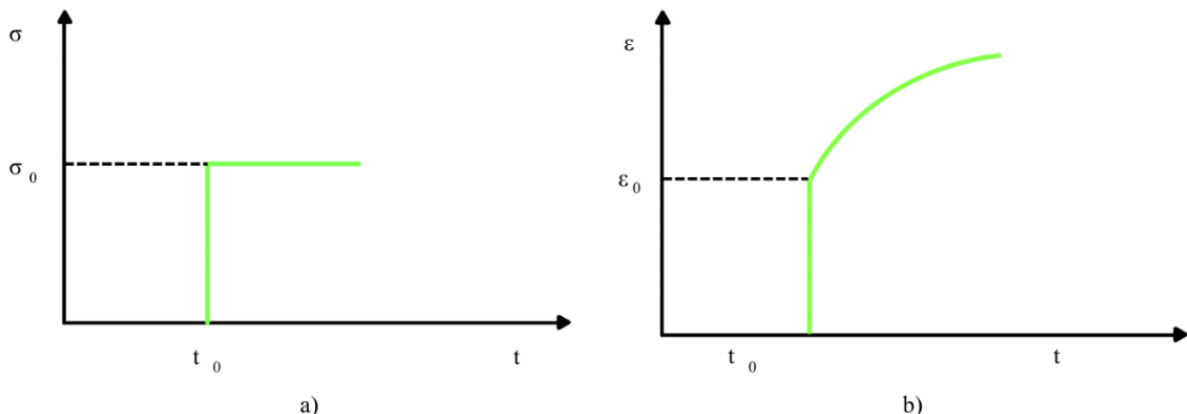
De modo geral, as séries de Prony (Equação 3) permitem ajustar a função de relaxação ao longo do tempo com base em resultados experimentais. No contexto do modelo de Maxwell, essa formulação conduz a uma expressão analítica para o decaimento da tensão quando se impõe uma deformação constante, fenômeno conhecido como relaxação. O módulo de relaxação em tração uniaxial é então definido pela razão entre a tensão requerida e a deformação aplicada. Conforme discutido por Christensen (1982), esse módulo pode ser obtido pela soma das contribuições de cada ramo de Maxwell, considerando que, em arranjos em paralelo, as deformações são equivalentes entre os elementos. A qualidade do ajuste depende do número de termos adotados na série, isto é, do nível de discretização utilizado para reproduzir a resposta temporal do material.

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon} E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i e^{\left(\frac{-t}{\rho_i}\right)} \quad (3)$$

Os parâmetros E_{∞} , E_i e ρ_i correspondem aos coeficientes da série de Prony, formada por n termos, utilizada para representar o comportamento viscoelástico linear do material em análise.

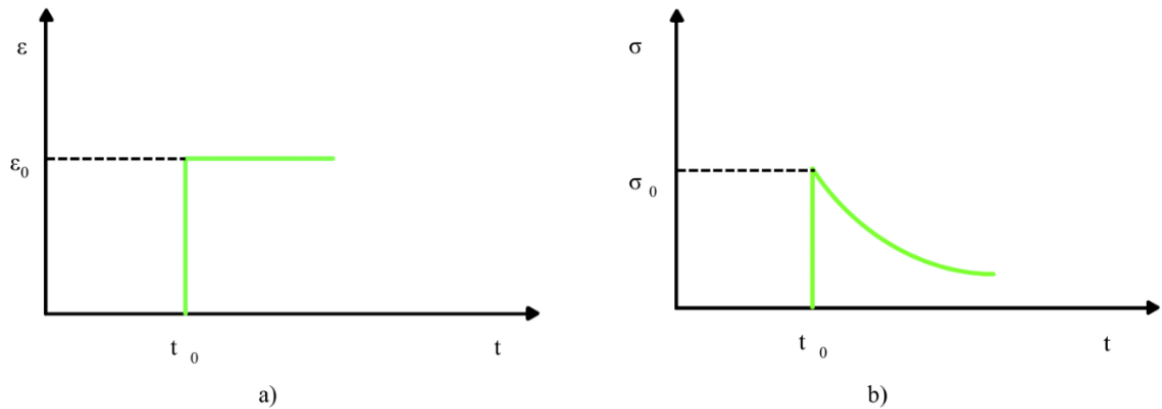
Conforme discutido, a viscoelasticidade se manifesta principalmente por dois mecanismos: fluência (*creep*) e relaxação. A fluência descreve a situação em que o material é submetido a uma tensão constante (entrada), $\sigma = \sigma_0$, e a resposta observada é uma deformação que evolui com o tempo, $\varepsilon(t)$, geralmente crescente, como ilustrado na Figura 9. Já o módulo de relaxação $E(t)$ é determinado impondo-se uma deformação constante (entrada), $\varepsilon = \varepsilon_0$, e registrando-se a redução gradual da tensão necessária para manter essa deformação, $\sigma(t)$, ao longo do tempo, conforme indicado na Figura 10.

Figura 10: Creep Compliance a) tensão aplicada; b) resposta de deformação



Fonte: adaptado de Di Benedetto e Corté (2005)

Figura 11: Módulo de Relaxação $E(t)$. (a) deformação aplicada; (b) resposta de tensão



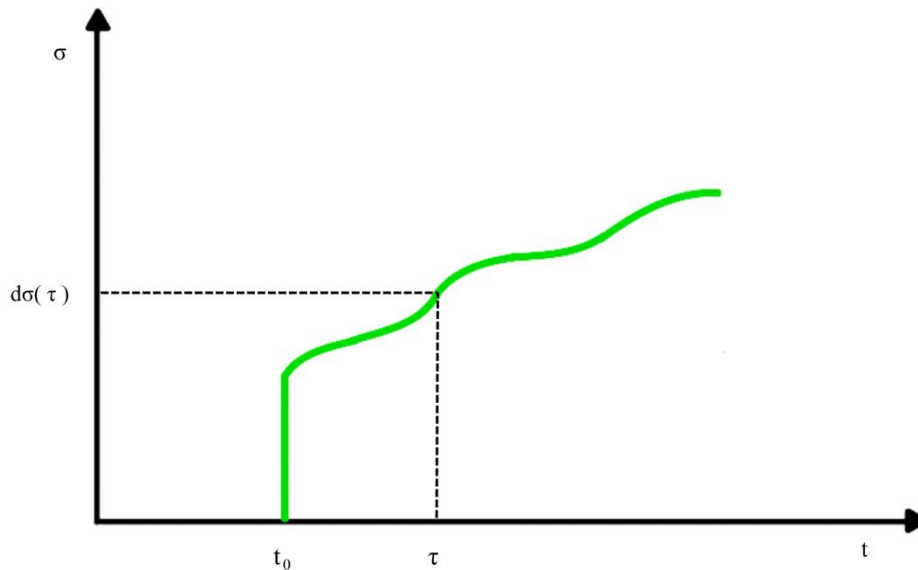
Fonte: adaptado de Di Benedetto e Corté (2005)

Após confirmar a validade da hipótese de viscoelasticidade linear, a função de fluência $D(t)$ passa a ser estabelecida como a razão entre as grandezas envolvidas, isto é, definida pela Equação 4:

$$D(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma_0} \quad (4)$$

A formulação da função de fluência pode ser generalizada para casos em que a tensão varia ao longo do tempo. Nessa abordagem, considera-se explicitamente o histórico de carregamento aplicado ao material, isto é, a sequência de tensões previamente impostas (Figura 12).

Figura 12: Histórico de tensões impostas na função Fluência



Fonte: adaptado de Di Benedetto e Corté (2005)

Assumindo que o material atende às premissas da viscoelasticidade linear, o princípio da superposição pode ser aplicado. Nesse contexto, a deformação total em um instante t resulta da soma das contribuições associadas a cada incremento de tensão imposto ao longo do tempo. Assim, a deformação pode ser escrita na forma integral como:

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t D(\tau, t) d\sigma(\tau) \quad (5)$$

Se $\sigma(t)$ for diferenciável, a expressão anterior pode ser reescrita evidenciando o termo inicial do carregamento:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0)D(t_0, t) + \int_{t_0}^t D(\tau, t) d\sigma(\tau) \quad (6)$$

Desconsiderando efeitos de envelhecimento, a função passa a depender apenas do intervalo de tempo, o que permite escrever:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0)D(t - t_0) + \int_{t_0}^t D(t - \tau) \sigma(\tau) d\tau \quad (7)$$

Aplicando integração por partes à Equação (7), obtém-se:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0)D(0) + \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial D}{\partial \tau}(t - \tau) d(\tau) \quad (8)$$

Nessa forma, o primeiro termo representa a resposta instantânea do material, enquanto o termo integral incorpora a influência das tensões aplicadas anteriormente, caracterizando a dependência temporal típica de materiais viscoelásticos.

De maneira equivalente, o módulo de relaxação $E(t)$ é definido por:

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (9)$$

Analogamente ao caso da compliância (fluência), quando o carregamento é imposto na forma de deformação, a tensão em qualquer instante pode ser expressa como:

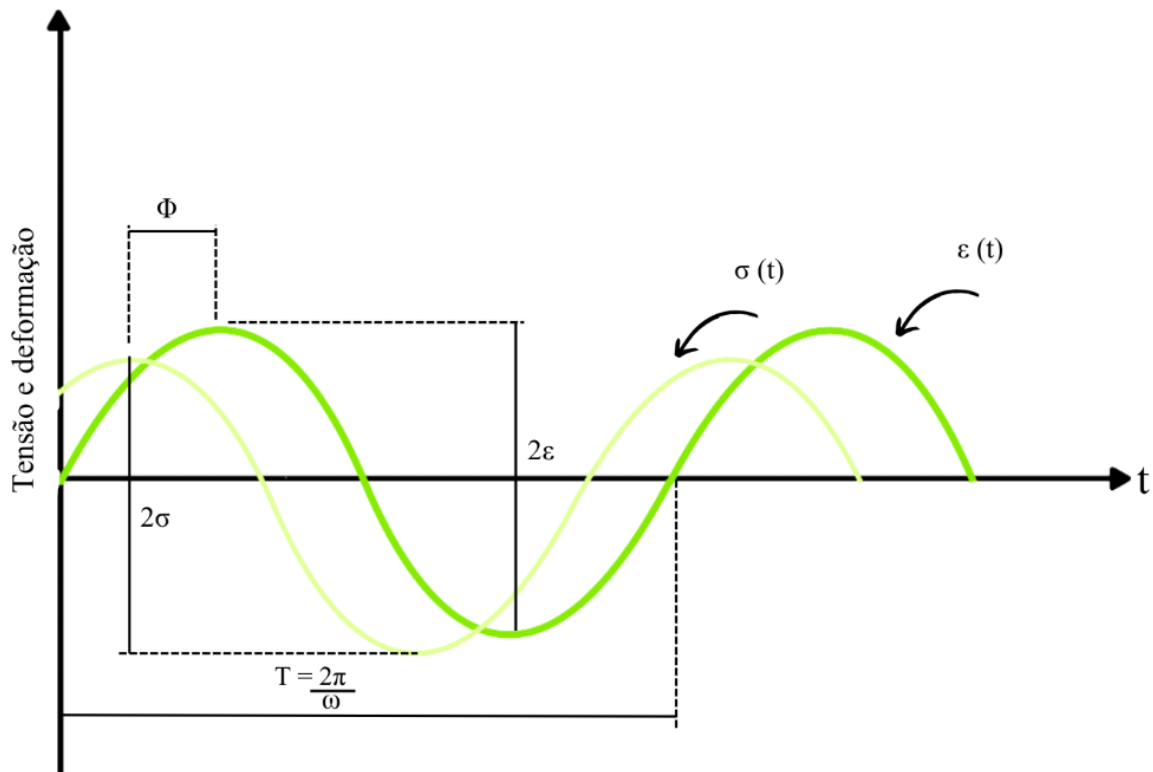
$$\sigma(t) = \varepsilon(t_0)E(0) + \int_{t_0}^t \varepsilon(\tau) \frac{\partial E}{\partial \tau}(t - \tau) d(\tau) \quad (10)$$

O módulo de relaxação $E(t)$ e a função de fluência $D(t)$ não constituem descrições independentes: ambos representam a mesma propriedade fundamental do material, isto é, sua resposta viscoelástica linear. Por esse motivo, para fins de caracterização experimental, a determinação de apenas uma dessas funções já é suficiente para descrever o comportamento do material. Ainda assim, diferentemente do que ocorre em materiais puramente elásticos, $E(t)$ e $D(t)$ não se relacionam como recíprocos no domínio do tempo, isto é, não vale a identidade $E(t) D(t) = 1$ no regime temporal (Ferry, 1980; Christensen, 1982; Kim, 2009). Essa reciprocidade só é recuperada quando se utiliza a transformada de Laplace e se trabalha no domínio complexo, no qual a transformada associada a $E(t)$ torna-se inversa da transformada de $D(t)$ (Queiroz, 2023).

As formulações de $E(t)$ e $D(t)$ são tradicionalmente deduzidas para condições de carregamento monotônico. Entretanto, na prática, é frequente que materiais viscoelásticos sejam solicitados por ações cíclicas (harmônicas/oscilatórias). Nesses casos, a caracterização passa a ser feita por dois parâmetros em regime estacionário: o módulo complexo $|E^*|$ e o ângulo de fase φ , que quantificam, respectivamente, a intensidade da resposta e o grau de defasagem entre tensão e deformação.

Quando se impõe uma deformação senoidal, a resposta do material ocorre na forma de uma tensão também senoidal, porém com um deslocamento temporal traduzido pelo ângulo de fase φ (Figura 13). Para um material puramente elástico, não há defasagem e $\varphi = 0^\circ$. Já para um material puramente viscoso, a defasagem é máxima, com $\varphi = 90^\circ$. Assim, em materiais viscoelásticos, o ângulo de fase assume valores intermediários, situando-se entre 0° e 90° .

Figura 13: Defasagem entre as ondas de tensão e de deformação durante solicitação harmônica em um material viscoelástico



Fonte: Adaptado de Di Benedetto e Corté (2005)

Conforme indicado na Figura 13, o módulo complexo pode ser obtido pela razão entre a amplitude da tensão cíclica (σ_0) e a amplitude da deformação axial recuperável (ε_0), resultando em:

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (11)$$

Em um carregamento uniaxial senoidal, a tensão pode ser descrita por uma forma complexa, equivalente à representação exponencial (Kim, 2009):

$$\sigma^* = \sigma_0 \cos(\omega t) + i\sigma_0 \sin(\omega t) = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (12)$$

Onde:

$$i = \sqrt{-1}$$

σ_0 é a amplitude de tensão;

ω é a frequência angular (rad/s) relacionada à frequência de carregamento (Hz) como $\omega = 2\pi f$.

Admitindo que a deformação imposta seja:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i\omega t} \quad (13)$$

A resposta em tensão para um material viscoelástico apresenta defasagem φ , podendo ser expressa como:

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i(\omega t + \varphi)} \quad (14)$$

Dessa forma, aplicando a relação entre tensão e deformação no domínio complexo e usando a teoria de Euler, obtém-se:

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0 e^{i(\omega t + \varphi)}}{\varepsilon_0 e^{i\omega t}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi} = |E^*| e^{i\varphi} = |E^*| (\cos \varphi + i \sin \varphi) = E_1 + iE_2 \quad (15)$$

Em que $E_1 = |E^*| \cos \varphi$ é o módulo de armazenamento, associado à parcela elástica da resposta e à energia que permanece armazenada ao longo do ciclo (isto é, $E_1 = \text{Re}(E^*)$).

Já $E_2 = |E^*| \sin \varphi$ corresponde ao módulo de dissipação (ou de perdas), ligado ao componente viscoso e à energia irreversivelmente dissipada durante o carregamento harmônico (ou seja, $E_2 = \text{Im}(E^*)$).

Assim como ocorre com o módulo de relaxação, E_1 e E_2 podem ser escritos em formas analíticas derivadas de modelos com análogos mecânicos. Adotando o Maxwell generalizado para representar a viscoelasticidade linear, os módulos de armazenamento e de dissipação são calculados por:

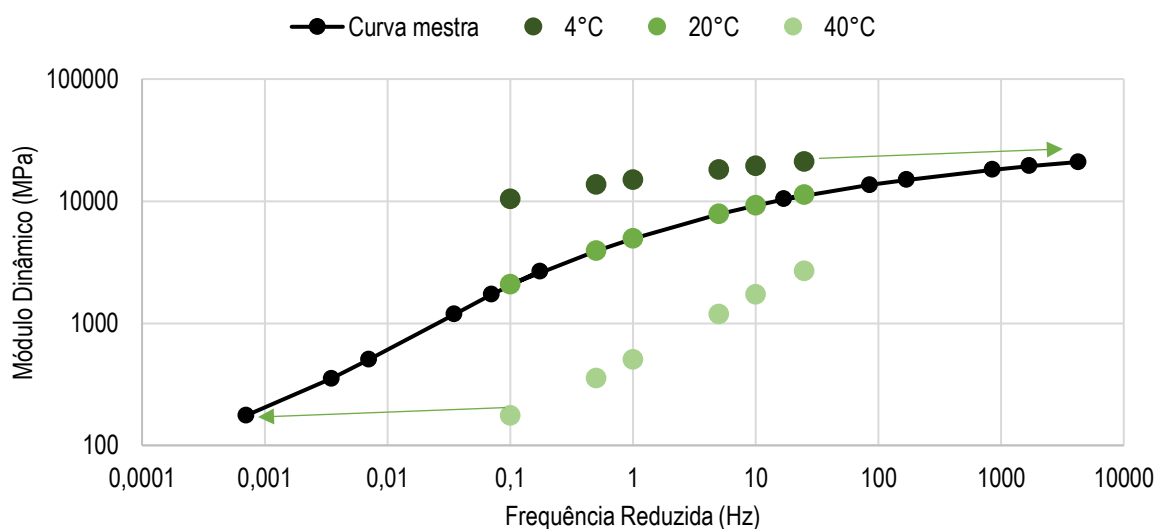
$$E_1 = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \frac{\omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (16)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^n E_i \frac{\omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (17)$$

Em misturas asfálticas, o valor de $|E^*|$ varia sensivelmente com temperatura, frequência e constituintes do compósito. Em condições de baixas frequências e temperaturas elevadas, o ângulo de fase tende a aumentar com a frequência; entretanto, em frequências mais altas e temperaturas menores, essa tendência pode se alterar, refletindo a interação entre ligante e esqueleto granular (Queiroz, 2023).

O ensaio de módulo complexo é utilizado para quantificar as propriedades viscoelásticas lineares de misturas asfálticas em corpos de prova cilíndricos, adotando-se pequenas amplitudes de deformação a fim de reduzir a ocorrência de danos e manter o material no regime linear. No contexto brasileiro, a DNIT 416/2019-ME define um procedimento experimental baseado na combinação de diferentes temperaturas e frequências de carregamento, possibilitando uma caracterização ampla da sensibilidade termo-frequencial do compósito. Usualmente, os resultados são organizados na forma de curva mestra, que sintetiza a resposta do material em um espectro estendido de condições de frequência e temperatura (Figura 14).

Figura 14: Ilustração de curva mestra obtido no ensaio de módulo dinâmico



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

As misturas asfálticas exibem uma resposta mecânica fortemente condicionada por temperatura e escala temporal (ou, de forma equivalente, pela frequência de solicitação). Nesse contexto, o princípio da superposição tempo–temperatura possibilita extrapolar o comportamento do material para combinações distintas de temperatura e frequência, a partir de resultados obtidos em uma condição de referência. Assim, conhecendo-se as propriedades em uma temperatura e frequência padronizadas, torna-se viável estimar a resposta para outros cenários de operação, o que é especialmente útil para antecipar o desempenho de pavimentos sob climas variados e diferentes velocidades de tráfego (Pivetta, 2018).

O conceito central da superposição tempo–temperatura (t–T) assume que um mesmo nível de resposta pode ser alcançado por diferentes pares (tempo de carregamento, temperatura). Na prática, isso permite condensar os efeitos de tempo e temperatura em um único parâmetro de deslocamento, obtendo-se a curva mestra: curvas de módulo dinâmico determinadas em várias temperaturas são transladadas horizontalmente até uma temperatura de referência, formando uma representação unificada do comportamento em um amplo espectro de condições (Fang *et al.*, 2025).

Para realizar essa translação das isotermas, adota-se um fator de deslocamento (shift factor), usualmente indicado por α_T , ajustado de modo a maximizar a continuidade e o melhor “encaixe” das curvas na construção da curva mestra. A aplicação desse fator conduz às frequências reduzidas (f_R), que reúnem, em uma mesma escala, resultados obtidos sob diferentes temperaturas. A curva mestra resultante é comumente ajustada por uma função sigmoideal, abordagem também utilizada no MEPDG (Guia Mecânico-Empírico) norte-americano, com faixa de aplicação frequentemente reportada temperaturas de -18 °C a 55 °C (Kim, 2009), conforme a Equação (18):

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log(\xi)}} \quad (18)$$

Onde:

δ = valor mínimo do módulo;

α = intervalo (amplitude) do valor do módulo;

ξ = frequência reduzida;

β, γ = parâmetros de ajuste.

O procedimento para estimar os coeficientes de translação α_T é feito por meio da Equação 19. A partir dessa equação, é possível deslocar a curva mestra para qualquer outra temperatura, diferente da T_r . Deve-se evitar a extrapolação da temperatura escolhida para a criação da curva mestra, optando por valores intermediários entre a maior e a menor temperatura ensaiada:

$$\log(\alpha_T) = a_1 T^2 + a_2 T + a_3 \quad (19)$$

Onde:

a_1, a_2 e a_3 = coeficientes de ajuste;

T = temperatura de ensaio °C;

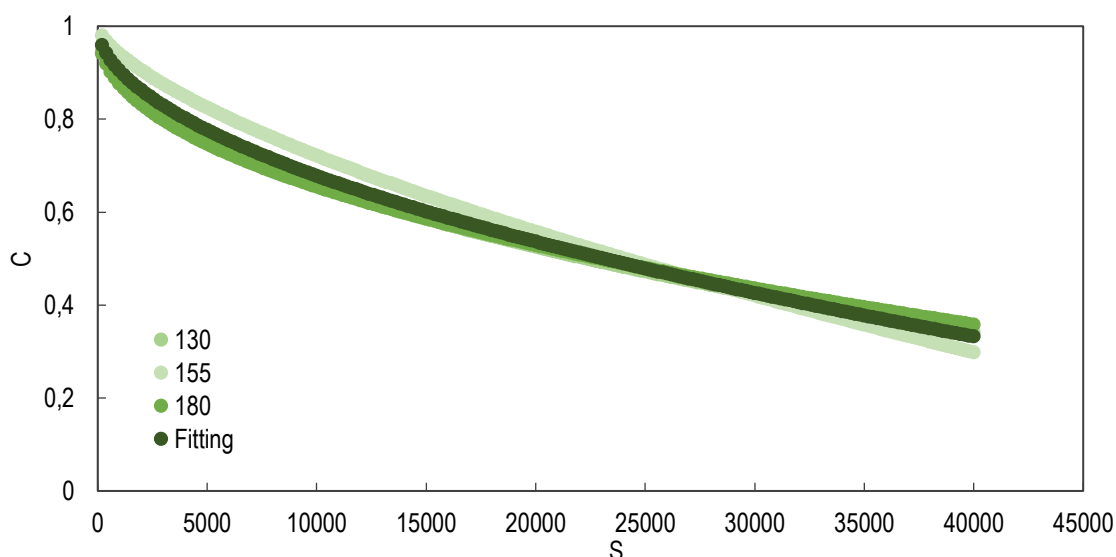
a_T = fator de deslocamento.

2.3.1. Modelo Viscoelástico de Dano Contínuo (VECD)

Na Universidade da Carolina do Norte, nos Estados Unidos, pesquisadores sob a coordenação do professor Richard Kim propuseram um modelo constitutivo denominado Viscoelastic Continuum Damage (VECD). A abordagem se baseia em propriedades intrínsecas do material para representar, de forma mecanicista, a progressão do dano (S) e a consequente perda de integridade (C) em misturas asfálticas (Figura 15).

Desde sua formulação, o VECD vem sendo amplamente investigado e aprimorado na literatura, com contribuições de diferentes autores e aplicações em múltiplos contextos, a exemplo de Kim (2009), Hou (2009), Underwood *et al.* (2012), Nascimento (2015), Zhao *et al.* (2023), Cao *et al.* (2016), Rahbar-Rastegar *et al.* (2017) e Zhao *et al.* (2024). Em conjunto, esses estudos evidenciam o VECD como uma ferramenta constitutiva robusta para interpretar o comportamento de misturas asfálticas, permitindo acompanhar a degradação do material e a variação de sua integridade ao longo do tempo.

Figura 15: Curva característica de dano



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

O modelo de dano contínuo em meio viscoelástico explora a própria natureza viscoelástica das misturas asfálticas e tem como produto central a curva característica de dano, que relaciona a integridade C ao nível de dano S (Figura 15). Essa relação é interpretada como uma propriedade intrínseca do material, não estando condicionada às particularidades do ensaio utilizado para obtê-la. Uma das principais vantagens desse arcabouço é permitir a simulação do desempenho da mistura sob diferentes combinações de ambiente e carregamento, viabilizando análises representativas para distintas condições de serviço e localidades (Nascimento *et al.*, 2014).

A formulação original do VECD foi concebida para situações de carregamento monotônico. Contudo, limitações operacionais do *Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT) — equipamento

empregado nos Estados Unidos, e a necessidade de estabelecer um critério de ruptura impulsionaram a adequação do modelo para ensaios de natureza cíclica (Nascimento *et al.*, 2014). Essa adaptação manteve a lógica de interpretação associada ao início do carregamento, especialmente ao primeiro ciclo, quando o acúmulo de dano tende a ser mais pronunciado, mas reorganizou a formulação para contemplar a repetição de cargas. A versão resultante passou a ser denominada *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD) (Queiroz *et al.*, 2023).

Em termos conceituais, a aplicação do método se apoia em três fundamentos: (i) o princípio de correspondência elástico–viscoelástico, (ii) a teoria do trabalho potencial proposta por Schapery, e (iii) o princípio de superposição tempo–temperatura (Nascimento *et al.*, 2014).

2.3.2. Princípio da Correspondência Elástico-Viscoelástico

O princípio da correspondência elástico–viscoelástico é uma base conceitual importante para a representação de materiais viscoelásticos, como as misturas asfálticas. Em termos gerais, esse princípio indica que a resposta de um material viscoelástico pode ser tratada por meio de um análogo elástico equivalente, desde que as propriedades viscoelásticas apropriadas sejam incorporadas à formulação. Na prática, escolhe-se um modelo elástico que consiga reproduzir, de forma aproximada, o comportamento do material real, o que torna a modelagem e a interpretação mais diretas (Cao *et al.*, 2016).

Para viabilizar essa equivalência, empregam-se pseudo-variáveis, como a pseudo-deformação ε^R , em substituição à deformação física medida, de modo a neutralizar explicitamente os efeitos do tempo na variável de deformação. A pseudo-deformação mantém analogia com a deformação real, porém é definida de forma a incorporar a hereditariedade viscoelástica na própria transformação. No VECD, para carregamentos transitórios, ε^R é obtida pela Equação (20); já no S-VECD, em condição de regime estacionário, utiliza-se a expressão indicada na Equação (21) (Fang *et al.*, 2025):

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (20)$$

$$\varepsilon_{0,ta}^R = \frac{1}{E_R} \times \frac{\beta+1}{2} \left((\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE} \right) \quad (21)$$

Onde:

ε^R –Pseudo-deformação;

ε – Deformação medida;

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

T - Variável de integração (s) e t o tempo físico (s).

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

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

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

$|E^*|_{LVE}$ - módulo dinâmico viscoelástico linear do material.

O uso de pseudo-variáveis favorece uma descrição mais eficiente do comportamento viscoelástico, simplificando a análise sob diferentes formas de carregamento e apoiando previsões de desempenho relevantes para projeto e manutenção de pavimentos (Dwivedi *et al.*, 2020).

Em muitos estudos adota-se $E_R = 1$. Nessa condição, ε^R passa a desempenhar o papel de uma variável “equivalente” no sentido elástico, permitindo escrever uma relação do tipo Hooke no espaço das pseudo-variáveis: $\sigma = E_R \varepsilon^R$. Para um material sem dano e em viscoelasticidade linear, a razão σ/ε^R , frequentemente denominada pseudo-módulo secante ou integridade (C), assume valor unitário (Hou, 2009; Babadopoulos, 2014).

Qualquer afastamento desse valor de referência indica que a resposta do material deixou de ser plenamente descrita pelo regime viscoelástico linear ideal, o que é interpretado como evidência de dano (Hou, 2009). No arcabouço VECD, C é entendido como um indicador da integridade física do material e é calculado por:

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R} \quad (22)$$

Para compatibilizar diferenças entre o módulo dinâmico da amostra ensaiada em fadiga (obtido no *fingerprint*) e o módulo dinâmico característico do regime viscoelástico linear, utiliza-se a razão conhecida como *Dynamic Modulus Ratio* (DMR), dada por:

$$DMR = \frac{|E^*|_{\text{fingerprint}}}{|E^*|_{LVE}} \quad (23)$$

Onde:

σ = tensão;

ε^R = pseudo-deformação;

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

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

Quanto à quantificação do dano (S), em ensaios monotônicos e no primeiro ciclo de ensaios cíclicos, o incremento dS_i é obtido pela Equação (24). Para os ciclos seguintes, utiliza-se uma forma simplificada, apresentada na Equação (25):

$$dS_i = \left(-\frac{1}{2} (\varepsilon^R)_i^2 \Delta C_i \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta \xi)_i^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (24)$$

$$dS_i = \left(-\frac{1}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)_i^2 \Delta C_i^* \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta \xi_p)_i^{\frac{1}{1+\alpha}} (K_1)^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (25)$$

Onde:

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

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

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

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

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

Conforme discutido por Hou (2009), o fator K_1 depende do histórico de carregamento, representado por $f(\xi)$. Admitindo que o crescimento de dano por ciclo seja pequeno, K_1 pode ser calculado por (Underwood *et al.*, 2012, apud Nascimento *et al.*, 2014):

$$K_1 = \frac{1}{\Delta \xi} \int_{\xi_i}^{\xi_f} (f(\xi))^{2\alpha} d\xi \quad (26)$$

Onde:

ξ_i e ξ_f são os tempos reduzidos de início e fim da parcela tratativa (associada ao dano) em um dado ciclo.

A curva característica C versus S pode ser representada por ajustes matemáticos. Entre as formas frequentemente empregadas estão um modelo do tipo potência (Equação 27) e outro exponencial (Equação 28). A seleção da forma mais adequada depende do material e do ajuste aos dados experimentais (Underwood *et al.*, 2012):

$$C(S) = 1 - C_{11} S^{C_{12}} \quad (27)$$

$$C(S) = e^{aS^b} \quad (28)$$

Uma vez conhecido o ajuste $C(S)$ para a mistura, é possível propagar o dano para outras condições por meio de uma expressão incremental, como:

$$S_{i+1} = S_i + \left(\frac{1}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 C_{11} C_{12} S^{C_{12}-1} \right)^{\alpha} K_1 (d\xi) \quad (29)$$

Onde:

C11 e C12 – constante do ajuste para a função potência;
 a e b – constante do ajuste para a função exponencial

2.3.3. Teoria do trabalho potencial

A teoria do trabalho potencial proposta por Schapery (1990) constitui o segundo fundamento do arcabouço de dano contínuo. Ela foi formulada para analisar materiais essencialmente elásticos que sofrem alterações internas ao longo do carregamento, como a progressão de microfissuras e a perda gradual de integridade. Sua base conceitual está ligada à termodinâmica dos processos irreversíveis, permitindo organizar a resposta do material de modo a distinguir a parcela associada à dissipação e, com isso, estabelecer uma lei de evolução do dano capaz de descrever a degradação do material de forma consistente (Hasan *et al.*, 2019).

Nessa abordagem, o desempenho mecânico de um sólido com mudanças estruturais pode ser expresso a partir do vínculo entre tensões generalizadas (σ) e deformações generalizadas (ε). Dependendo do problema, essas variáveis podem ser representadas por diferentes pares físicos equivalentes, como força–deslocamento ou tensão–deformação. De modo geral, o trabalho virtual associado a uma variação admissível de deformação é dado por:

$$\delta W = \sigma_i \times \delta \varepsilon_i \quad (30)$$

Onde:

δW - Trabalho virtual

$\delta \varepsilon_i$ - Deformações virtuais.

A formulação de Schapery se apoia em três componentes principais: (i) uma função densidade de energia de deformação, (ii) a relação constitutiva tensão–deformação e (iii) uma lei que governa a evolução do dano (Kim, 2009; Nascimento, 2015; Hasan *et al.*, 2019). Entretanto, como a teoria foi originalmente estruturada para materiais elásticos e sua aplicação a misturas asfálticas, de natureza viscoelástica, exige a utilização do princípio da correspondência elástico–viscoelástico discutido anteriormente. Para isso, as expressões passam a ser escritas em termos de pseudo-deformação (em substituição à deformação física), e a energia de deformação é redefinida como energia de pseudo-deformação (Queiroz *et al.*, 2023):

$$W^R = W^R(\varepsilon^R, S_m) \quad (31)$$

$$\sigma = \frac{\partial W^R}{\partial \varepsilon^R} \quad (32)$$

$$S_m = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial S_m} \right)^{\alpha_m} \quad (33)$$

Onde:

S_m - Variável de estado interno de dano;

W^R - Densidade de energia de pseudodeformação;

σ = tensor de tensões [MPa];

ε = tensor de deformações;

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

Com a correspondência elástico-viscoelástico, a hereditariedade típica dos materiais viscoelásticos é incorporada via formulação com pseudo-variáveis (associada a integrais de convolução), de modo que a energia clássica de deformação é convertida em uma pseudo-energia, ampliando o alcance da teoria para materiais como misturas asfálticas (Nascimento *et al.*, 2015). Nessa estrutura, a relação constitutiva para um material viscoelástico sem dano pode ser escrita como:

$$\sigma = E_R \varepsilon^R \quad (34)$$

e, quando há dano, a resposta é reduzida por uma função de integridade (ou pseudorrigidez):

$$\sigma = C(S) \varepsilon^R \quad (35)$$

em que $C(S)$ é a pseudorrigidez associada ao nível de dano S , representando a perda de integridade do material à medida que o dano evolui.

2.4. Fadiga em Misturas Asfálticas

A fadiga constitui um dos mecanismos mais relevantes de deterioração dos pavimentos flexíveis, caracterizando-se pela formação progressiva de microtrincas induzidas pela repetição de tensões e deformações ao longo do tráfego (Figura 16). Trata-se de um processo cumulativo, no qual a integridade estrutural da mistura asfáltica se reduz até o aparecimento de trincas visíveis, comprometendo a durabilidade, o conforto e a segurança dos usuários. Conforme discutido por Shan *et al.* (2022), o dano por fadiga decorre da deterioração interna da mistura, associada à interação entre vazios, argamassa e agregados, resultando em perda de rigidez do material e redução da sua capacidade resistente.

Figura 16: Trinca/Fadiga em pavimento asfáltico



Fonte: Autoria própria (2026)

A literatura destaca que a avaliação laboratorial da fadiga pode ser realizada por meio de diferentes metodologias, como flexão em quatro pontos, compressão diametral e tração direta ou tração-compressão. No contexto brasileiro, o ensaio por compressão diametral ainda é amplamente utilizado, embora apresente limitações relacionadas ao estado não homogêneo de tensões e à dificuldade de separar os efeitos de fluência e fadiga (Oliveira *et al.*, 2023).

Para superar essas restrições, têm se difundido ensaios mais avançados, especialmente os de tração direta e tração-compressão, que permitem controlar simultaneamente tensão, deformação e temperatura, representando melhor as solicitações cíclicas de campo.

O ensaio de tração direta (ou tração-compressão), em particular, tem ganhado destaque por sua capacidade de capturar o comportamento viscoelástico e o dano progressivo da mistura. Esse método oferece maior sensibilidade para diferenciar misturas com diferentes taxas de rigidez e modificações, incluindo polímeros, borracha moída e aditivos sustentáveis. Estudos como o de Schuster *et al.* (2023) demonstram que o ensaio fornece parâmetros essenciais do comportamento mecânico, permitindo avaliar a evolução da rigidez, a dissipação de energia e a taxa de dano ao longo do carregamento cíclico.

Associado aos ensaios de tração, o modelo Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD) tem se consolidado como uma das abordagens mais robustas para prever o desempenho à fadiga. Baseado na teoria da viscoelasticidade linear e da mecânica do dano contínuo, o modelo utiliza curvas de relaxação, rigidez reduzida e taxa de dano para prever a vida de fadiga em diferentes condições de carga, temperatura e frequência. Pesquisas recentes reforçam sua aplicabilidade, como aquelas reportadas por Shan *et al.* (2022), que utilizaram imagens de microtomografia (X-ray CT) para

correlacionar a evolução interna de vazios ao comportamento mecânico, demonstrando boa aderência do S-VECD à realidade física da mistura.

Além disso, trabalhos brasileiros que aplicam o S-VECD em softwares como LVECD evidenciam sua utilidade prática para o dimensionamento mecanístico-empírico. Schuster *et al.* (2023) verificaram que o método permite classificar misturas quanto ao seu desempenho à fadiga e simular a evolução de trincas em estruturas hipotéticas, oferecendo parâmetros confiáveis para o projeto de pavimentos.

Resultados similares foram encontrados por Guabiroba *et al.* (2023), os quais demonstram que misturas adequadamente selecionadas podem alcançar classes superiores no MeDiNa, refletindo melhor desempenho em campo. De forma geral, observa-se uma tendência de integração entre experimentação laboratorial, modelagem mecanística e imagens de alta resolução, permitindo compreender não apenas quando ocorre o dano, mas como ele se inicia e se propaga dentro da mistura. Essa evolução metodológica tem ampliado a eficiência dos ensaios de fadiga, reduzido incertezas e promovido soluções mais duráveis, alinhadas às demandas contemporâneas por infraestruturas resilientes e sustentáveis.

2.4.1. Ensaio de fadiga por tração direta

O ensaio de fadiga por tração direta consolidou-se, nas últimas décadas, como uma das metodologias mais precisas e representativas para avaliar o comportamento de misturas asfálticas submetidas a carregamentos cíclicos. Embora os primeiros estudos sobre fadiga tenham surgido nas décadas de 1950 e 1960, baseados majoritariamente em ensaios de flexão e compressão diametral, somente a partir dos anos 1990 a comunidade científica passou a reconhecer a necessidade de métodos capazes de impor um estado de tensões homogêneo e minimizar interferências de mecanismos viscoelásticos não relacionados ao dano (Kim *et al.*, 2002).

Historicamente, os métodos tradicionais (como flexão em quatro pontos e compressão diametral) desempenharam papel importante na evolução do conhecimento sobre fadiga; contudo, apresentavam limitações significativas. A flexão em quatro pontos, por exemplo, gera um gradiente de tensões ao longo da altura do corpo de prova, o que dificulta o isolamento do dano real. Já a compressão diametral, amplamente utilizada no Brasil, envolve um estado de tensões altamente complexo, com combinação de tração e compressão e presença intensa de fluência, fenômeno que mascara a evolução do dano por fadiga (Oliveira *et al.*, 2023). Essas limitações motivaram o desenvolvimento de um método mais fiel à realidade estrutural do pavimento.

Nesse contexto, o ensaio de tração direta uniaxial surge como uma alternativa capaz de superar essas restrições. O método aplica um carregamento cíclico no sentido longitudinal, impondo deformações ou tensões controladas ao corpo de prova, geralmente no formato cilíndrico. Essa configuração garante que o material seja submetido a um campo de tensões uniforme, proporcionando leitura mais precisa da

evolução da rigidez, do acúmulo de dano e da dissipação de energia ao longo dos ciclos. Shan *et al.* (2022) destacam que a adoção desse ensaio tem permitido correlacionar, com maior confiabilidade, variações microestruturais (identificadas por técnicas como microtomografia X-ray CT) com a degradação mecânica da mistura.

O avanço no controle de deformações e na instrumentação eletrônica embutida nos equipamentos modernos contribuiu para que o ensaio se tornasse mais sensível às alterações de composição da mistura. Estudos recentes demonstram que o ensaio é capaz de identificar diferenças entre misturas convencionais e modificadas — com polímeros, borracha moída, aditivos reológicos e fibras — com maior clareza do que os métodos tradicionais (Schuster *et al.*, 2023). Esse nível de sensibilidade permite, inclusive, a identificação de pequenas variações no teor de ligante ou na estrutura volumétrica, tornando o método especialmente útil em pesquisas voltadas para materiais sustentáveis.

Um marco importante na história do ensaio foi sua integração a modelos mecanísticos avançados, especialmente o S-VECD (Simplified Viscoelastic Continuum Damage). Desenvolvido no início dos anos 2000, esse modelo revolucionou a análise de fadiga ao permitir que resultados experimentais de tração direta fossem convertidos em parâmetros de dano capazes de prever a vida útil da mistura sob diferentes condições de carregamento e temperatura (Kim *et al.*, 2009). Desde então, o S-VECD tem sido ampliado e refinado, incorporando novas ferramentas de caracterização e melhorando a capacidade de previsão da vida de fadiga em estruturas reais (Zhao *et al.*, 2023).

A aplicabilidade crescente do ensaio de tração direta pode ser observada também em métodos de dimensionamento mecanístico-empírico. Softwares como o LVECD e o MeDiNa vêm incorporando parâmetros derivados desse ensaio, permitindo simular o comportamento da mistura ao longo da vida útil do pavimento com maior precisão. Estudos recentes indicam que misturas avaliadas por tração direta e caracterizadas por S-VECD tendem a apresentar melhor correlação entre desempenho laboratorial e desempenho em campo, reforçando a relevância do método na engenharia contemporânea de pavimentos.

Assim, observa-se que a evolução histórica do ensaio de tração direta reflete o próprio avanço da mecânica dos pavimentos: da necessidade de superar limitações experimentais iniciais, passando pela consolidação de modelos viscoelásticos de dano, até seu papel central na avaliação de materiais inovadores e sustentáveis. Dada sua elevada precisão, sensibilidade e representatividade, o ensaio continua sendo uma das principais referências para estudos avançados de fadiga e para o desenvolvimento de misturas asfálticas de alto desempenho.

2.5. Deformação Permanente em Misturas Asfálticas

A deformação permanente, ou afundamento em trilha de roda, é um dos defeitos estruturais mais frequentes em pavimentos asfálticos e está diretamente associada à perda de capacidade funcional e de segurança da via, como representado na Figura 17. Em termos práticos, manifesta-se como rebaixamentos longitudinais nas faixas de rolamento, concentrados nas trilhas de roda, que podem acumular água, aumentar o risco de aquaplanagem e intensificar esforços dinâmicos sobre a estrutura do pavimento. No contexto brasileiro, esse tipo de dano é amplamente reportado em rodovias submetidas a tráfego pesado, sendo reconhecido como uma das principais causas de degradação precoce das camadas asfálticas e, em muitos casos, também das camadas inferiores do pavimento (Mensch, 2022).

Figura 17: Deformação longitudinal na trilha de roda (deformação permanente)



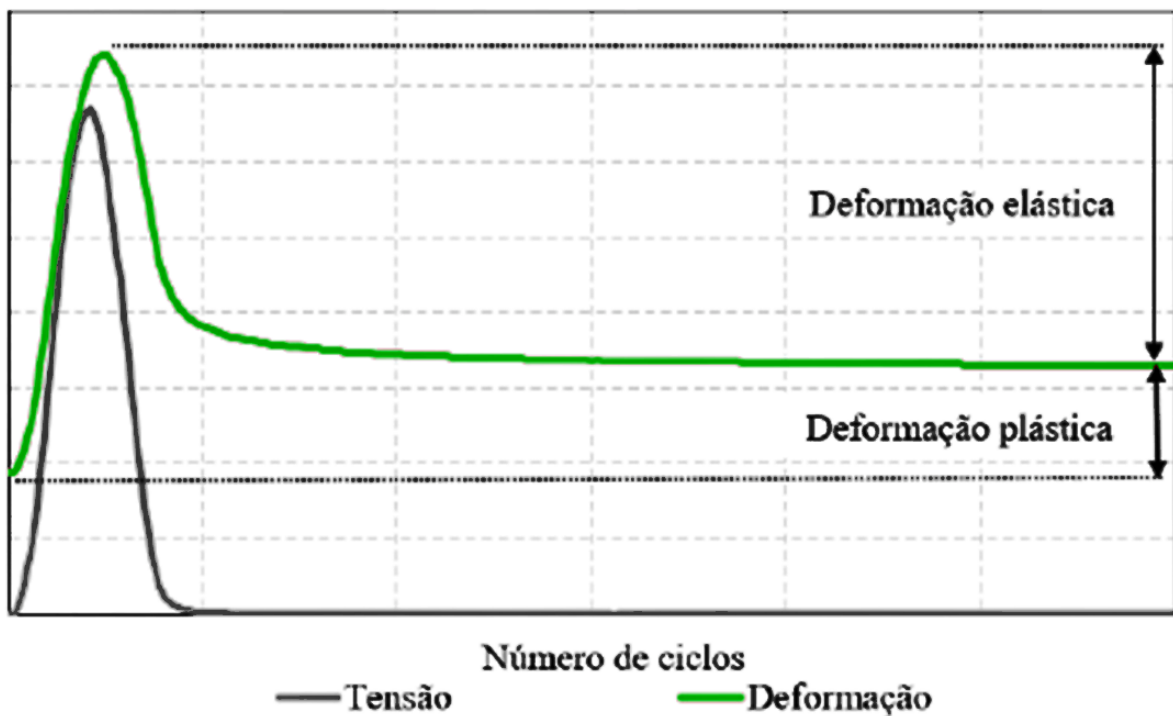
Fonte: Adaptado de Ildefonso *et al.* (2025)

Do ponto de vista mecânico, a deformação permanente resulta da acumulação de deformações plásticas irreversíveis ao longo da vida em serviço do pavimento. Esse acúmulo pode ocorrer por três mecanismos principais: densificação excessiva, fluência da mistura asfáltica e ruptura estrutural das camadas. A densificação está associada, sobretudo, a insuficiência de compactação inicial ou a teores elevados de vazios, que permitem uma acomodação progressiva da mistura sob o tráfego. Já a fluência está relacionada à resposta viscoplástica do ligante e da massa asfáltica em temperaturas elevadas, quando o ligante perde rigidez e a mistura passa a apresentar escoamento sob tensões de cisalhamento repetidas. Por fim, a deformação estrutural permanente envolve não apenas a camada de revestimento, mas também as camadas de base e sub-base, ocorrendo quando a estrutura global do pavimento é incapaz de suportar as solicitações impostas, resultando em deformações concentradas e duradouras ao longo da profundidade (Mensch, 2022; Lopes, 2022).

A suscetibilidade de um pavimento à deformação permanente está ligada à combinação entre tráfego, clima, materiais e projeto estrutural. Cargas por eixo elevadas, alto volume de veículos comerciais e baixas velocidades de operação aumentam a severidade das tensões nas trilhas de roda. Estudos indicam que, embora parcela significativa do afundamento possa ser atribuída ao comportamento dos agregados e ao arranjo granulométrico, parâmetros ligados ao ligante – como grau de desempenho, presença de modificadores e envelhecimento – também exibem forte correlação com o desempenho à deformação permanente (Bastos, 2016; Barros *et al.*, 2022).

A Figura 18 ilustra o princípio mecânico que está por trás da deformação permanente (afundamento em trilha de roda) em pavimentos asfálticos: sob a aplicação de um pulso de tensão (curva cinza), a mistura desenvolve uma deformação total (curva vermelha) composta por uma parcela elástica recuperável (que retorna parcialmente após o descarregamento) e uma parcela plástica irreversível (que permanece ao final de cada ciclo).

Figura 18: Resposta da deformação devido ao carregamento dinâmico



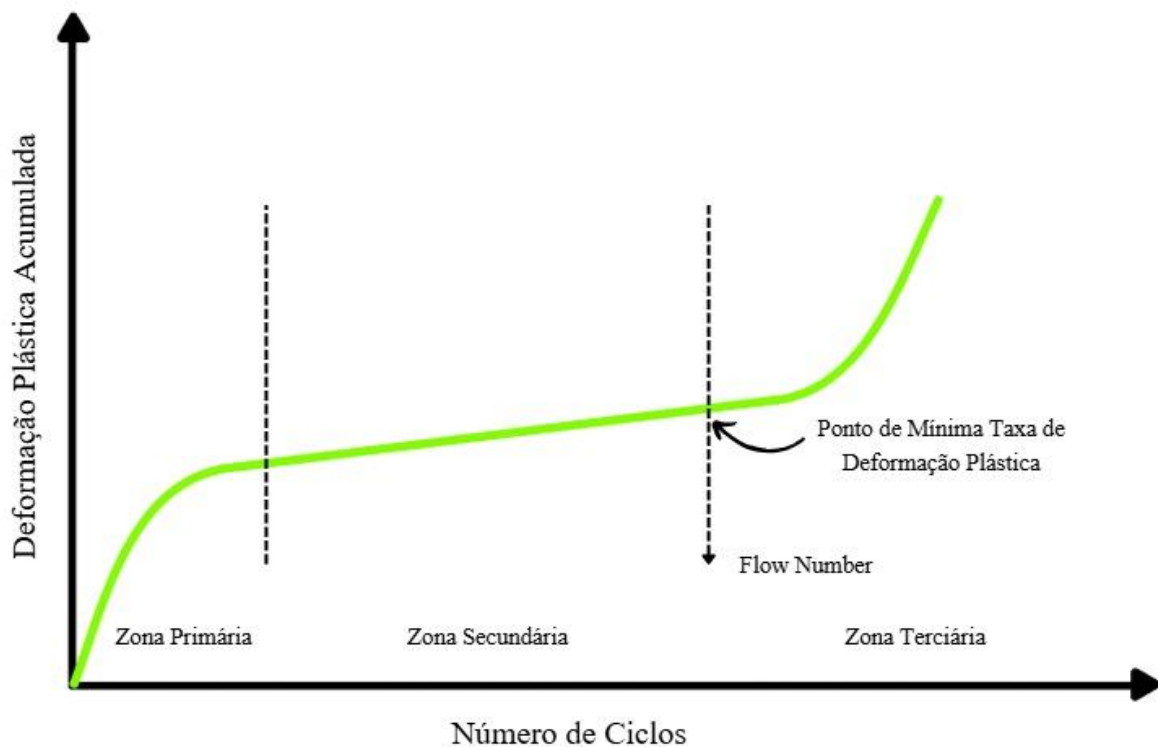
Fonte: Adaptado de Mensch (2022)

É justamente o acúmulo progressivo dessa deformação plástica ao longo do número de ciclos que se manifesta em campo como a deformação permanente, podendo refletir mecanismos combinados de densificação e escoamento/cisalhamento da mistura em temperaturas elevadas e/ou sob altos níveis de tensão. Em termos de desempenho, a taxa de crescimento da deformação residual e a eventual transição para um regime acelerado (associado ao “*flow*”) são a base conceitual de parâmetros

laboratoriais usados para classificar a resistência à deformação permanente, como aqueles obtidos em ensaios de carga repetida/*Flow Number* e em metodologias derivadas como o *Stress Sweep Rutting* (SSR). (Kim, 2009).

O gráfico apresentado na Figura 19 mostra a evolução da deformação plástica acumulada (eixo y) em função do número de ciclos de carga (eixo x), típica de ensaios de *creep* dinâmico/*repeated load* para avaliar susceptibilidade ao afundamento em trilha de roda. A curva costuma ser interpretada em três zonas (primária, secundária e terciária), e o *Flow Number* é associado ao ponto em que ocorre a menor taxa de variação da deformação permanente, marcando o início do escoamento terciário (Bonaquist, 2012).

Figura 19: Deformação plástica acumulada vs. ciclos (FN)



Fonte: Autoria própria (2026)

Na zona primária, observa-se um crescimento mais rápido no início, geralmente ligado à acomodação/densificação da mistura, com redução progressiva da taxa de deformação à medida que os ciclos avançam. Na zona secundária, a curva tende a um comportamento quase linear, caracterizando um regime de taxa aproximadamente constante (estágio “estável”) de evolução da deformação permanente. Por fim, na zona terciária, ocorre aceleração da deformação, indicando instabilidade do esqueleto da mistura e maior propensão a deformação, por isso, o FN é tomado no ponto de mínima taxa de deformação permanente (ou, de forma equivalente, no início do terciário), funcionando como um indicador prático de resistência à deformação permanente (Bonaquist, 2012;).

Para compreender e controlar esse fenômeno, diferentes ensaios laboratoriais são empregados, que podem ser agrupados em ensaios fundamentais e ensaios de simulação. Os ensaios fundamentais buscam caracterizar diretamente o comportamento viscoplástico da mistura, permitindo correlacionar propriedades mecânicas com o potencial de deformação permanente. Entre eles, destacam-se o ensaio de *creep* estático ou dinâmico, que avalia a deformação sob tensão constante ao longo do tempo; o ensaio uniaxial de carga repetida (*Flow Number*), normatizado no Brasil pela ABNT NBR 16505 e pelo DNIT 184/2018-ME, no qual se determina o número de ciclos até o início da zona terciária de deformação; e os ensaios triaxiais de varredura de tensões, como o *Triaxial Stress Sweep* (TSS) e o *Stress Sweep Rutting* (SSR), que permitem estudar a resposta viscoplástica da mistura sob diferentes níveis de tensão e condições de confinamento (Mensch, 2022).

Complementarmente, os ensaios de simulação procuram reproduzir, em escala reduzida ou ampliada, as condições de carregamento e ambiente do pavimento. Nessa categoria se inserem simuladores de tráfego em laboratório, como o *French Rutting Tester* (LCPC), o *Asphalt Pavement Analyzer* (APA) e o *Hamburg Wheel Tracking Test* (HWT), amplamente utilizados para quantificar o afundamento em trilha de roda sob carregamentos repetidos em temperatura controlada (Mensch, 2022). Os resultados desses ensaios têm sido empregados tanto para ranqueamento de misturas – selecionando aquelas com menor tendência a deformação – quanto para calibração de modelos de previsão presentes em métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento, como o *Pavement ME Design*, que relacionam o desempenho observado em laboratório às condições reais de tráfego e clima (AASHTO, 2015).

Em síntese, a deformação permanente em pavimentos asfálticos é um fenômeno multifatorial, dependente da interação entre materiais, tráfego e clima, e que exige abordagem integrada entre projeto, controle tecnológico e avaliação laboratorial. A compreensão dos mecanismos de densificação, fluência e ruptura estrutural, associada à utilização de ensaios fundamentais e de simulação, é essencial para o desenvolvimento de misturas e estruturas mais resistentes, capazes de garantir maior durabilidade e segurança às rodovias.

2.6. Stress Sweep Rutting (SSR)

O ensaio SSR é um método de caracterização da resistência de misturas asfálticas à deformação permanente conduzido no *Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT), no qual a resposta é obtida sob carregamentos cíclicos e interpretada por meio do *permanent deformation shift model*. A principal particularidade do SSR, em relação a ensaios conduzidos em um único nível de sollicitação, é empregar uma varredura de tensões organizada em blocos sucessivos, de modo a quantificar como a mistura evolui

do regime de resposta predominantemente recuperável para um regime de acúmulo acelerado de deformação permanente quando a severidade do carregamento aumenta (Mensch *et al*, 2022).

O mesmo foi desenvolvido como uma alternativa mais eficiente para caracterização da susceptibilidade à deformação permanente em misturas asfálticas, especialmente quando o objetivo não é apenas ranquear materiais, mas também obter parâmetros compatíveis com modelagem mecanicista do desempenho em pavimento. A motivação central do SSR é superar limitações de métodos tradicionais: ensaios do tipo *loaded wheel* (ex.: APA, Hamburg) são amplamente aplicados, porém tendem a fornecer respostas mais comparativas e menos adequadas para calibração de modelos preditivos, já protocolos mecanicistas robustos, como o TSS, conseguem calibrar modelos de deformação, mas exigem alto custo e tempo experimental, com múltiplas temperaturas, níveis de tensão e replicatas (Kim, 2019).

Nesse cenário, Kim (2019) propõem o SSR como um teste triaxial de carga repetida estruturado em blocos de tensão, capaz de analisar, com menor esforço, os efeitos combinados de temperatura, tensão desviadora, tempo de carga e repouso sobre o acúmulo de deformação permanente. Do ponto de vista conceitual, o SSR está diretamente associado ao shift model para deformação permanente. Esse modelo descreve a deformação por meio de uma curva-mestra de deformação permanente (*mastercurve*) obtida em condição de referência e de funções de deslocamento (*shift functions*) que transportam a resposta do material para diferentes condições de carregamento e temperatura.

Em termos práticos, a calibração envolve separar o comportamento de deformação permanente em uma componente “base” (a curva-mestra) e aplicar deslocamentos que representam como a resposta muda quando se alteram o tempo efetivo de carregamento/temperatura e a tensão aplicada, permitindo trabalhar com um número reduzido de ciclos que incorpora esses efeitos de forma sistemática (Specht *et al.*, 2003).

Essa estrutura fica explícita nas equações fundamentais apresentadas pelos autores. A evolução da deformação permanente é representada por um modelo incremental (curva-mestra) em função do número reduzido de ciclos, expresso pela Equação 36, em que ε_{vp} é a deformação viscoplástica (permanente), ε_0 , N_I e b são parâmetros da curva-mestra e N_{red} é o número reduzido de ciclos (Zhao *et al.*, 2023). Assim, o SSR não se limita a “medir” deformação em um nível de tensão específico, ele fornece dados para ajustar ε_0 , N_I e b , que controlam a forma e a taxa de evolução do acúmulo de deformação na condição de referência.

$$\varepsilon_{vp} = \varepsilon_0 \frac{N_{red}}{(N_I + N_{red})^b} \quad (36)$$

Para transferir resultados entre condições de ensaio, o shift model utiliza dois deslocamentos principais: um associado ao tempo de carregamento reduzido e outro associado à tensão vertical. O deslocamento do tempo de carregamento reduzido é definido na Equação 37, onde a_{np} é o fator de deslocamento do tempo de carregamento reduzido, p_1 e p_2 são coeficientes e n_p representa o tempo de carregamento reduzido (Wang *et al.*, 2017).

$$a_{np} = p_1 \log(n_p) + p_2 \quad (37)$$

Já o deslocamento associado à tensão vertical é dado pela Equação 38, em que a_{rv} é o fator de deslocamento de tensão vertical, d_1 e d_2 são coeficientes, r_v é a tensão vertical e P_a é a pressão atmosférica (Kelm *et al.*, 2025).

$$a_{rv} = d_1 \log\left(\frac{r_v}{P_a}\right) + d_2 \quad (38)$$

Com esses dois deslocamentos, o número físico de ciclos (N) é convertido em número reduzido de ciclos (N_{red}), concentrando em uma única variável os efeitos de tempo/temperatura e de tensão. A expressão para essa redução é apresentada na Equação 39, com $A = 10^{(p_2)} \cdot 10^{(d_2)}$ (Bertollo *et al.*, 2000).

$$N_{red} = A \cdot N \cdot n_p^{(p_1)} \cdot \left(\frac{r_v}{P_a}\right)^{(d_1)} \quad (39)$$

Na prática, essas relações tornam possível superpor dados obtidos em diferentes blocos de tensão e diferentes tempos de pulso na mesma curva-mestra, e é exatamente essa capacidade que sustenta o uso do SSR como ensaio de calibração mecanicista, em vez de apenas classificação.

A principal inovação metodológica do SSR é reduzir drasticamente o esforço experimental necessário para obter os parâmetros do modelo. No TSS, a calibração utiliza três níveis de tensão desviadora em blocos crescentes (483, 689 e 896 kPa) aplicados nos ensaios *Multiple Stress Sweep* (MSS), além de um ensaio de referência, o que eleva significativamente o tempo total (Kim, 2019).

No SSR, a referência pode ser incorporada ao próprio ensaio por meio de um arranjo específico dos blocos: na temperatura alta (TH), os autores introduzem um bloco de tensões invertidas (ou “*reversed loading block*”) na sequência 689, 483 e 896 kPa, de modo que o primeiro bloco (689 kPa) já forneça a curva de referência e, assim, elimine a necessidade do ensaio de referência separado (Oda *et al.*, 2001). Em contraste, na temperatura baixa (TL), o SSR mantém blocos crescentes com os mesmos níveis de tensão desviadora (483, 689 e 896 kPa) para compor a varredura e viabilizar a obtenção dos fatores de deslocamento associados à tensão (Silva *et al.*, 2018).

Essa escolha é justificada porque, no protocolo original com blocos crescentes (483, 689, 896 kPa), apenas o primeiro bloco contém informação suficiente para representar simultaneamente os trechos primário e secundário necessários à curva-mestra, ao inverter os dois primeiros níveis e iniciar em 689 kPa, o SSR passa a obter a referência diretamente do primeiro bloco, reduzindo tempo e número de corpos de prova (Kim, 2019).

Em paralelo, o protocolo é avaliado quanto à possibilidade de diminuir o tempo improdutivo do teste associado ao repouso entre pulsos, uma vez que o repouso domina a duração total do ensaio em varreduras longas. Ao testar repouso menores (10 s, 5 s e 3 s) para a condição de alta temperatura com blocos invertidos, o estudo observa que as diferenças na deformação permanente acumulada tendem a ser pequenas e frequentemente do mesmo nível da variabilidade entre corpos de prova, indicando viabilidade prática de reduzir repouso sem comprometer a qualidade da calibração (Kelm *et al.*, 2025).

Em síntese, no SSR os blocos de tensões utilizados seguem os níveis 483, 689 e 896 kPa, porém, diferentemente do TSS (blocos crescentes em todas as etapas), o SSR aplica na temperatura alta um bloco invertido (689, 483 e 896 kPa) para transformar o primeiro bloco em referência, mantendo na temperatura baixa blocos crescentes (483, 689 e 896 kPa) para completar a calibração dos deslocamentos de tensão (Silva *et al.*, 2018).

Além da formulação do shift model Bertollo *et al.* (2000) também apresentam relações auxiliares que apoiam a definição das condições de ensaio. Por exemplo, a seleção da temperatura alta pode ser estimada por uma expressão em função de variáveis climáticas e da profundidade da camada apresentada na Equação 40, onde DD representa os *degree-days* (graus-dia) onde a temperatura é maior que 10 °C e H é a profundidade da camada analisada, já a temperatura baixa deve ser estabelecida com base no *Performance Grade* (PG) do ligante asfáltico empregado, conforme apresentado na Tabela 1.

$$T_H = 58 + 7 \cdot DD - 15 \cdot \log(H + 45) \quad (40)$$

Tabela 1: Temperaturas baixas de ensaio recomendadas para cada PG

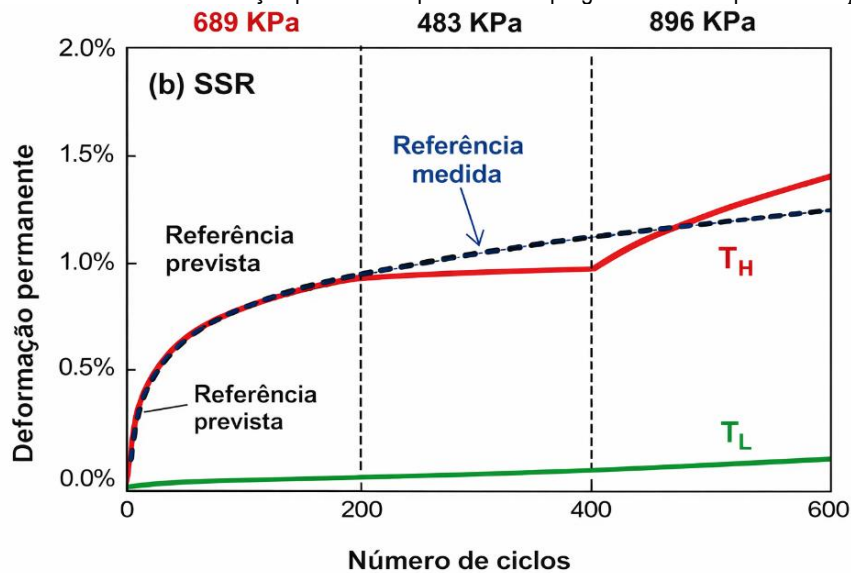
PG temperatura baixa (°C)	PG temperatura alta (°C)						
	46	52	58	64	70	76	82
-10	23	26	29	32	32	32	32
-16	20	23	26	29	32	32	32
-22	17	20	23	26	29	32	32
-28	17	17	20	23	26	29	32
-37	17	17	17	20	23	26	29
-40	17	17	17	17	20	23	26
-46	17	17	17	17	17	20	23

Fonte: Adaptado Mensch (2022)

Essas expressões reforçam a intenção do SSR de padronizar e tornar rastreável a escolha de condições representativas para caracterização da deformação, mantendo coerência com a lógica de tempo–temperatura implícita no conceito de carregamento reduzido.

Em termos de resultados fornecidos, o SSR entrega um conjunto de parâmetros que permite representar a deformação permanente de forma transferível entre condições, isto é, os coeficientes do shift model que descrevem: a evolução da deformação na curva-mestra (pela Equação 36) e as relações de deslocamento associadas ao efeito de tempo/temperatura e ao efeito de tensão (Equações 37–39). A utilidade disso aparece quando esses parâmetros são inseridos em ferramentas de previsão estrutural de pavimentos, em que o material calibrado pode ser utilizado em simulação por camadas para estimar o *rut depth* (profundidade de trilha de roda) ao longo do tempo sob clima e tráfego, somando contribuições de deformação permanente por subcamadas do revestimento (Barreto *et al.*, 2024). A Figura 20 apresenta um modelo de gráfico que é obtido no ensaio de SSR.

Figura 20: Curvas de deformação permanente para tensões progressivas e temperaturas T_H e T_L .



Fonte: Adaptado de Kim (2019)

Para além de calibrar o shift model e permitir previsões mecanicistas de deformação permanente, os resultados do SSR podem ser convertidos em um indicador de desempenho em nível de pavimento, incorporando clima, tráfego e uma estrutura padrão para tornar a interpretação mais aderente às condições de serviço. Nessa perspectiva, Liu *et al.* (2025) propõem o *Rutting Strain Index* (RSI) como um índice derivado do SSR e de simulação estrutural, com o propósito de transformar parâmetros laboratoriais em uma métrica comparável entre misturas sob um mesmo cenário de severidade.

O RSI é definido como a deformação permanente média da mistura (em %) prevista para uma estrutura padrão de pavimento, calculada com base em dados climáticos do local e em um cenário de tráfego previamente estabelecido, o que permite avaliar o potencial de deformação de forma mais

representativa do campo do que métricas estritamente laboratoriais (Bertollo *et al.* 2000). Nesse arranjo, os parâmetros obtidos no SSR (via calibração do shift model) alimentam a simulação, e o RSI passa a sintetizar o desempenho esperado no pavimento para a combinação adotada de estrutura–clima–tráfego, oferecendo uma base objetiva para comparação de misturas sob um mesmo “ambiente de projeto” (Kim, 2019).

Para operacionalizar a interpretação do RSI no tratamento de resultados, compilam-se limiares de aceitação associados ao nível de tráfego (MESAL), permitindo classificar a adequação da mistura em função da severidade do carregamento. Esses limites são particularmente úteis para discussões que buscam traduzir resultados do SSR em critérios de aplicação, pois viabilizam uma leitura direta do tipo “mistura adequada para tráfego pesado/muito pesado”, em vez de uma interpretação apenas relativa entre materiais (Beja *et al.*, 2020).

Tabela 2: Classificação do *Rutting Strain Index* (RSI) em função do nível de tráfego (MESAL)

Nível de tráfego (MESAL)	Limite de RSI	Classificação de tráfego
< 10	RSI < 12	Padrão
Entre 10 e 30	RSI < 4	Pesado
> 30	RSI < 2	Muito pesado
> 30 e tráfego lento	RSI < 1	Extremamente pesado

Nota: MESAL = um milhão do número equivalente de eixos simples (ESAL).

Fonte: Adaptado de Kim (2019).

Com base nessa classificação, o tratamento dos resultados de SSR pode ser enriquecido ao reportar, além dos parâmetros do *shift model*, o RSI calculado e sua categoria de tráfego equivalente (Tabela 1). Assim, por exemplo, valores RSI < 4 indicam desempenho compatível com tráfego pesado (10–30 MESAL), enquanto RSI < 2 sugere adequação para tráfego muito pesado (>30 MESAL); em cenários de tráfego lento, o critério torna-se mais restritivo (RSI < 1) (Kim, 2019). Dessa forma, o RSI atua como uma ponte interpretativa entre o laboratório e o pavimento, permitindo discutir o SSR não apenas como ensaio de caracterização, mas como ferramenta de decisão técnica para enquadramento de misturas em níveis de solicitação reais.

Com isso, a verificação do SSR inclui tanto um cenário com histórico aleatório de carregamento (tensões e tempos variando) quanto a comparação das previsões de profundidade de trilha de roda obtidas com parâmetros calibrados por SSR e por TSS, observando-se elevada proximidade entre as estimativas, o que sustenta a equivalência do SSR como alternativa simplificada (Kim, 2019).

Além do ganho de tempo e simplificação de protocolo, o SSR também mira a operacionalização do ensaio. O estudo discute a possibilidade de medir deformação permanente a partir do deslocamento

do atuador (em vez de LVDTs diretamente no corpo de prova), reduzindo complexidade de instrumentação e tempo de preparação (Wang *et al.*, 2017).

Reconhece-se, contudo, que o uso do deslocamento do atuador pode introduzir erro devido à complacência do sistema, especialmente em condições mais rígidas (baixas temperaturas), e por isso é proposto um procedimento de correção, onde após a correção, as previsões estruturais de deformação tornam-se muito próximas às obtidas com instrumentação direta, indicando que essa simplificação pode ser tecnicamente aceitável em determinadas condições de laboratório (Kim, 2019).

Em síntese, o SSR se destaca por combinar duas vantagens que raramente aparecem juntas em ensaios de deformação permanente: a redução do custo/tempo de ensaio, por eliminar etapas e encurtar ciclos operacionais, e a capacidade de calibração mecanicista, ao produzir parâmetros compatíveis com o shift model e, conseqüentemente, com previsões de profundidade de trilha de roda em nível de pavimento. Por isso, quando exige-se interpretar deformação permanente para além de uma classificação pontual (conectando resultados de laboratório às condições de serviço e às variáveis de carregamento e temperatura) o SSR oferece um arcabouço tecnicamente consistente para avaliação e comparação de misturas asfálticas (Castañeda-Robles *et al.*, 2024).

2.7. Considerações Finais

A consolidação de estratégias mecanicistas para avaliação do desempenho de misturas asfálticas modificadas com borracha tem tratado deformação permanente e fadiga como respostas acopladas do compósito ligante–agregado. No âmbito da deformação permanente, o *Stress Sweep Rutting* (SSR) destaca-se por utilizar varredura progressiva de tensões, permitindo identificar a transição entre regimes viscoelástico, viscoplástico e de dano acelerado, bem como diferenciar misturas em função de granulometria, teor de ligante e tipo de modificador.

No campo da fadiga, a adoção de abordagens avançadas, com ênfase em ensaios de tração direta, tem sido motivada pela necessidade de impor um estado de sollicitação mais representativo e controlar simultaneamente tensão, deformação e temperatura, reduzindo limitações associadas a estados não homogêneos de tensões em métodos tradicionais.

Esse avanço é coerente com o emprego de modelos de dano como o S-VECD, que acopla viscoelasticidade e evolução do dano via pseudo-variáveis e permite descrever a progressão do trincamento por parâmetros como a pseudo-rigidez (C) e sua taxa de degradação em diferentes condições termo-frequenciais.

Nesse enquadramento, a borracha assume papel de variável de projeto do material, pois o método de incorporação e a interação ligante–borracha condicionam simultaneamente a resposta

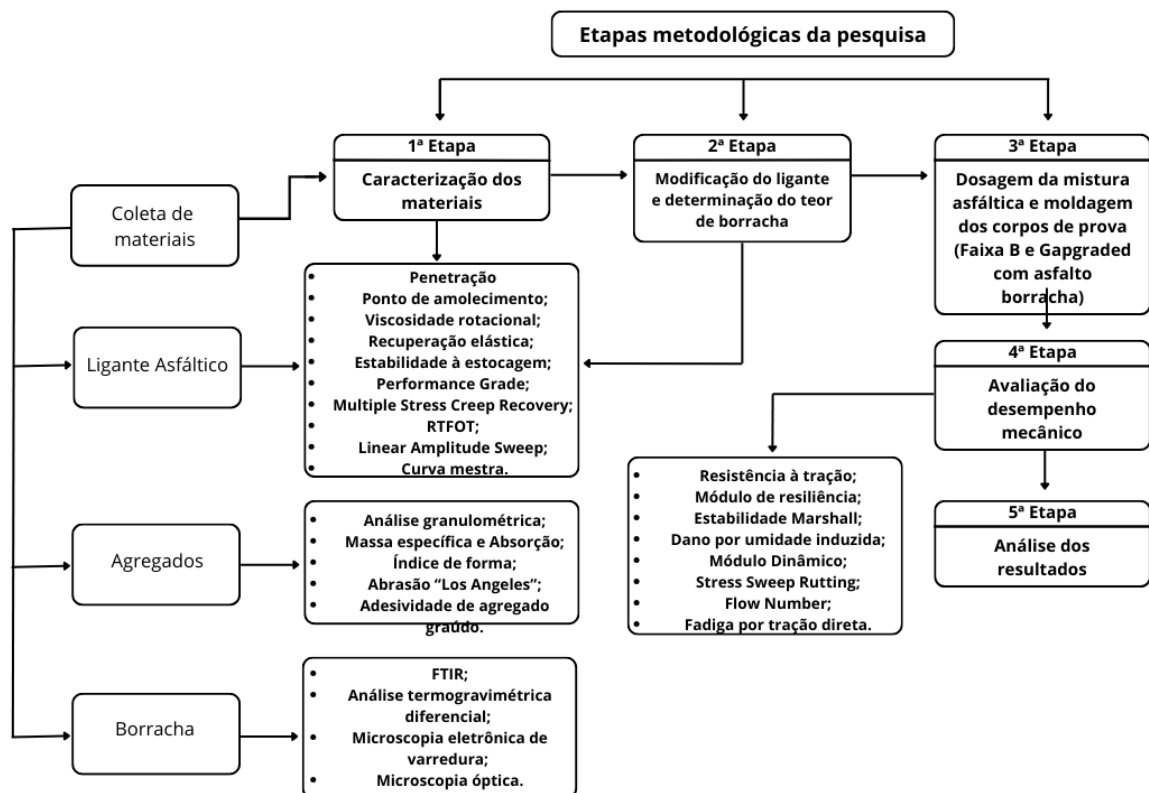
viscoplástica (associada à deformação) e a tolerância ao dano (associada à fadiga), sobretudo quando combinadas a estruturas internas capazes de mobilizar intertravamento e estabilidade da mástica.

Dessa forma, a avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas com asfalto-borracha por meio dos ensaios de SSR e fadiga por tração direta justifica-se por fornecer, de forma complementar, indicadores sensíveis tanto ao potencial de deformação permanente sob espectro de tensões quanto à evolução do dano cíclico até o trincamento, oferecendo base experimental consistente para comparar misturas, apoiar decisões de dosagem/estrutura e orientar o desempenho em condições representativas de tráfego e temperatura.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais empregados e os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento da pesquisa. A metodologia adotada nesta dissertação foi estruturada em etapas sequenciais, visando garantir a adequada caracterização dos materiais, a modificação do ligante asfáltico e a avaliação do desempenho das misturas asfálticas produzidas. As atividades desenvolvidas ao longo da pesquisa abrangem desde a coleta e caracterização dos materiais até a análise dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos. A Figura 21 apresenta o fluxograma que sintetiza as etapas metodológicas da pesquisa.

Figura 21: Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Os ensaios experimentais foram conduzidos no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.1. Materiais

Os materiais empregados no desenvolvimento desta pesquisa consistiram em borracha oriunda de pneus inservíveis, agregados minerais — brita 3/4", brita 1/2" e pó de pedra — e ligante asfáltico (CAP 50/70).

3.1.1. Agregados

Para a produção das misturas asfálticas, foram utilizados agregados minerais de origem granítica, constituídos por brita com dimensão nominal máxima de 19 mm (3/4"), brita com dimensão nominal máxima de 12,5 mm (1/2") e pó de pedra, todos provenientes da região de Campina Grande, no estado da Paraíba, e fornecidos pela Rocha Asfalto e Mineração.

O Quadro 1 apresenta os ensaios realizados para a caracterização dos agregados e suas respectivas normas.

Quadro 1: Ensaios dos agregados e normas

Ensaios	Norma/Procedimento
Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos por peneiramento	DNIT 412/2025 - ME
Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas	DNIT 413/2021 - ME
Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas	DNIT 411/2021 - ME
Determinação do índice de forma com crivos	DNIT 424/2020 - ME
Determinação do desgaste por abrasão e impacto no equipamento "Los Angeles"	DNIT 451/2024 - ME
Adesividade ao ligante asfáltico	DNIT 452/2024 - ME

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Os resultados obtidos nos ensaios realizados estão apresentados na Tabela 3, estando em conformidade com os critérios e limites estabelecidos nas respectivas normas técnicas aplicáveis, atendendo às exigências de aceitação quanto aos parâmetros avaliados.

Tabela 3: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados

Ensaios	Und.	Especificação DNIT	Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Pó de pedra
Massa específica real	g/cm ³	//	2,743	2,752	2,555
Massa específica aparente	g/cm ³	//	2,708	2,695	2,540
Densidade relativa real do agregado	g/cm ³	//	2,751	2,760	2,563
Densidade relativa aparente do agregado	g/cm ³	//	2,716	2,702	2,548
Absorção	%	≤ 2	0,47	0,78	0,24
Índice de forma		0,5 - 1,0	0,88	0,58	//
Abrasão Los Angeles	%	≤ 50,0	24,08	22,13	//

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

3.1.2. Borracha

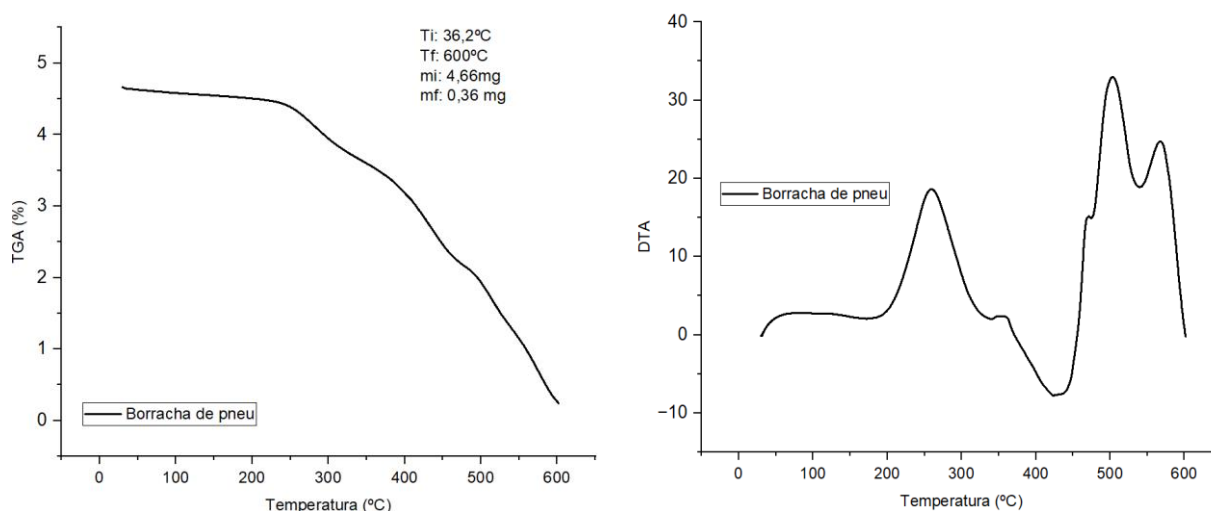
A borracha triturada foi fornecida por uma empresa de reciclagem e beneficiamento de pneus localizada no estado de São Paulo, sendo previamente submetida a um processo de separação magnética por meio de rolo magnético, realizado pela empresa responsável, destinado à remoção de partículas metálicas remanescentes. O material fornecido apresenta granulometria passante na peneira nº 40 (0,42 mm). A Figura 22 ilustra borracha triturada adotada na pesquisa.

Figura 22: Borracha triturada de pneus inservíveis passante na peneira nº 40



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Para a caracterização da borracha utilizada nesta pesquisa, foram realizados ensaios físico-químicos e microestruturais com o objetivo de compreender seu comportamento térmico, morfológico e estrutural, onde os ensaios foram realizados nos laboratórios da UFCG. A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi empregada para identificar os principais grupos funcionais presentes no material, permitindo avaliar sua composição química e possíveis interações com outros constituintes do sistema. A análise termodiferencial e termogravimétrica (DTA/TGA) foi utilizada para investigar a estabilidade térmica da borracha e os estágios de degradação em função da temperatura. A Figura 23 apresenta as curvas termogravimétricas obtidas para a borracha de pneu em estudo.

Figura 23: Termograma da borracha de pneu

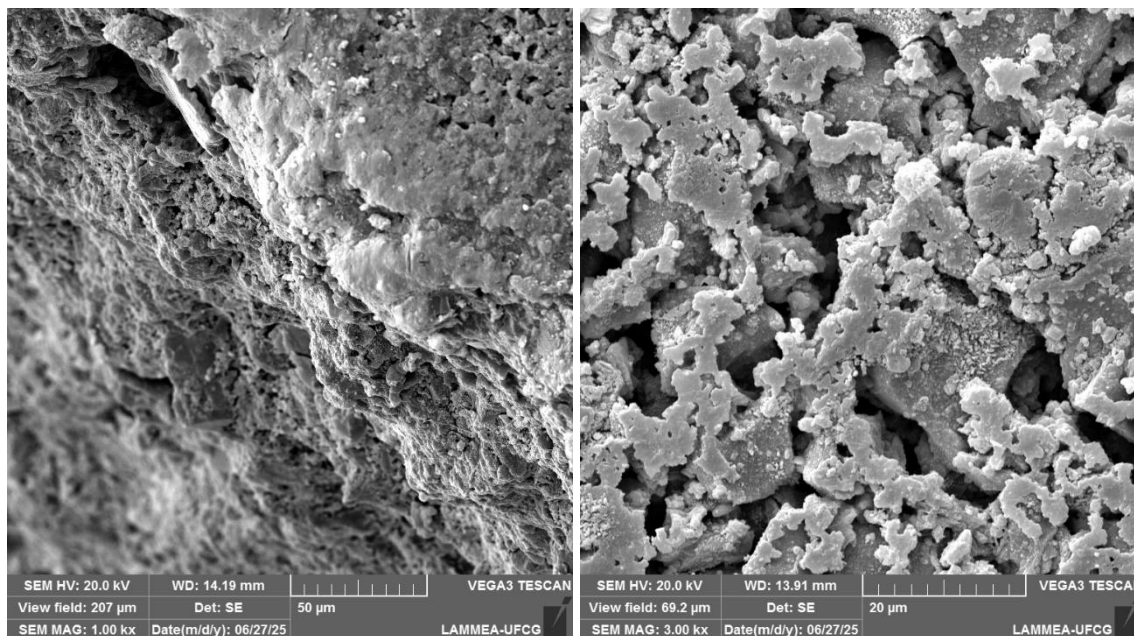
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A curva da análise termodiferencial indica quatro estágios de decomposição térmica da borracha de pneu, a primeira e a segunda região de decomposição entre 250 e 430°C, referem-se aos componentes plastificantes voláteis e à formação de radicais da borracha natural e borracha estireno-butadieno e a terceira e quarta região, situadas entre 480 e 580°C corresponde a despolimerização (formando mono/dímeros) e reações de desvolatilização/condensação de borracha natural e borracha estireno-butadieno e à cisão C-C para formar o C=C. A curva termogravimétrica indica uma perda de massa final correspondente a 92,27% da amostra, o que corresponde a uma massa final de 0,36g.

Estudos realizados por Menares et al. (2020), identificaram 8 etapas de decomposição que podem ser explicadas pelos picos da primeira derivada, que correspondem a perda de massa, em função da temperatura em diferentes fases de reações que ocorrem durante a pirólise dos pneus. Esses estudos apresentaram resultados semelhante ao observado nesta pesquisa.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) possibilitou a análise da morfologia superficial e da textura das partículas de borracha, evidenciando características como rugosidade, forma e possíveis discontinuidades. Complementarmente, a microscopia óptica foi aplicada para uma avaliação macroscópica da distribuição e homogeneidade do material. A Figura 24 ilustra os resultados obtidos para a micrografia da borracha.

Figura 24: Micrografias da borracha de pneu



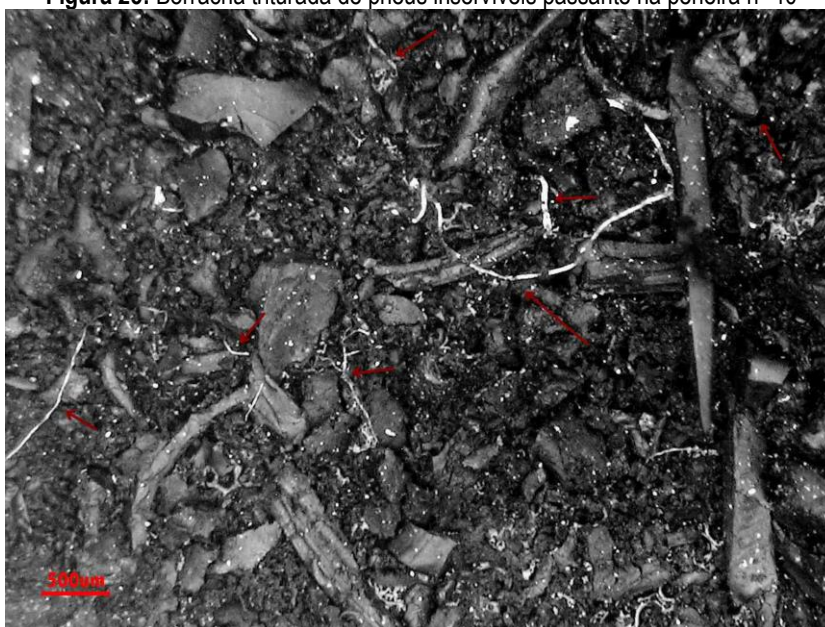
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) expõe uma superfície rugosa, correspondente aos poros presentes na borracha de pneu, evidenciando ainda que a amostra apresenta características de não uniformidade estrutural, indicando que a textura dos fragmentos também é diversificada, possivelmente em virtude do método de obtenção (moagem ou fragmentação) da borracha de pneu. A presença de poros de tamanhos variados pode ser observada em toda a superfície da amostra, desse modo, a superfície de contato presente nos fragmentos não é uniforme, podendo interferir na viscosidade do material.

Resultados semelhantes foram obtidos por Lima (2008) que observou também uma presença considerável de poros. A porosidade da borracha é um dos fatores causadores do aumento da viscosidade dos ligantes asfálticos modificados com borracha. Os óleos aromáticos (frações leves) constituintes do ligante entram nos poros da borracha, promovendo uma dilatação das cadeias poliméricas.

A análise por microscopia óptica (MO) da borracha evidencia uma morfologia heterogênea, composta por partículas com formas irregulares e dimensões variadas, característica típica de borracha proveniente do processo de trituração mecânica de pneus. Observa-se na Figura 25, obtida por análise microscópica, superfícies com textura rugosa e bordas angulosas, indicando a presença de discontinuidades geradas durante o processamento, o que pode favorecer a interação mecânica com outros materiais.

Figura 25: Borracha triturada de pneus inservíveis passante na peneira nº 40



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

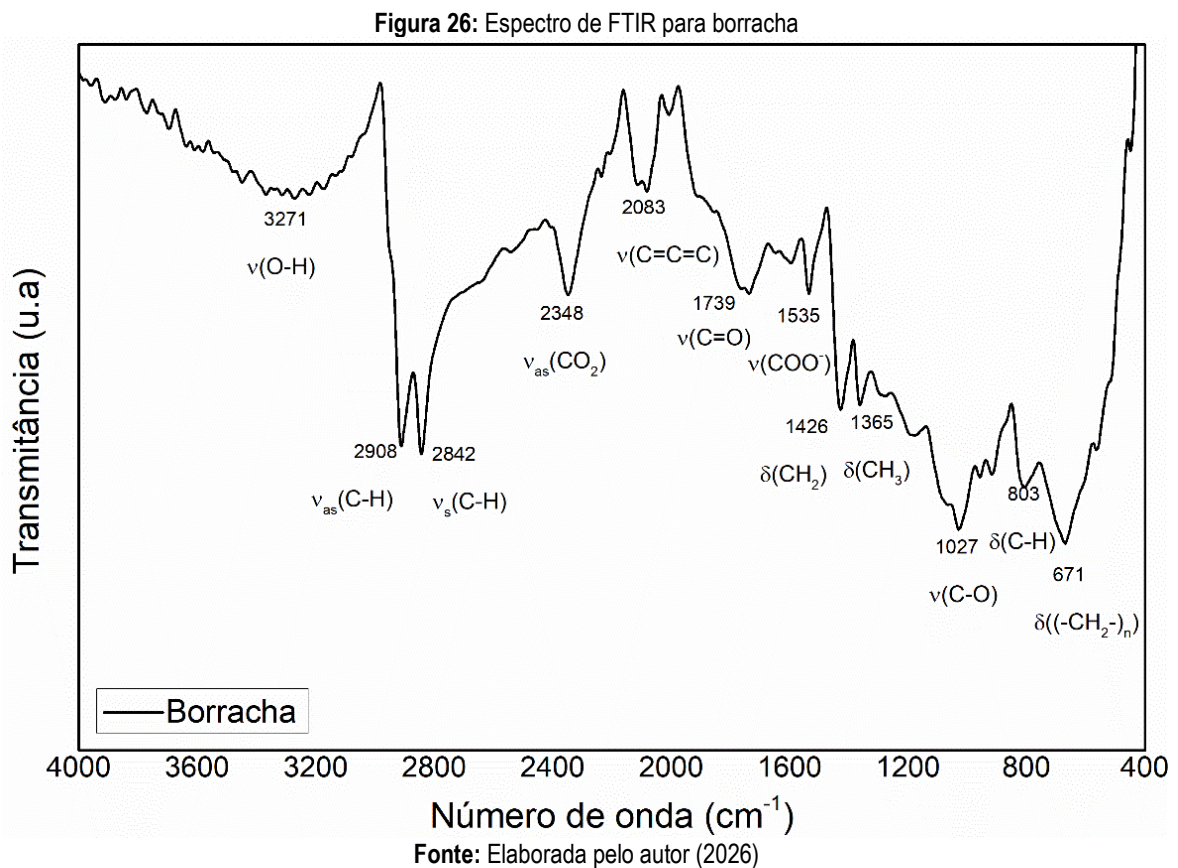
As regiões mais claras destacadas na imagem correspondem à presença de fibras residuais de natureza metálica, remanescentes do sistema de reforço original do pneu. A presença dessas fibras metálicas residuais em borrachas provenientes da trituração de pneus é um aspecto frequentemente relatado na literatura, sendo atribuída à dificuldade de remoção completa dos elementos de reforço metálico durante o processamento mecânico do material (Yildirim, 2007; Lo Presti, 2013). A imagem de microscópio foi obtida utilizando escala de 500 µm, a qual permitiu a visualização das partículas de borracha e de suas características morfológicas, como forma, tamanho e presença de fibras metálicas residuais.

A presença de fibras metálicas residuais na borracha moída utilizada na modificação de ligantes asfálticos é tecnicamente indesejável, pois compromete a uniformidade e a estabilidade do sistema. Mashaan et al. (2014, p. 6) destacam que a borracha moída deve ser um material “livre de fibras e aço”, enquanto a FHWA (2001, p. 33) estabelece que esse modificador deve estar “substancialmente livre de contaminantes, incluindo tecido, metal, material mineral e outras substâncias não borrachosas”. À luz dessas recomendações, infere-se que o aço residual atua como contaminante, podendo prejudicar a homogeneidade do ligante modificado, favorecer sedimentação e instabilidade de estocagem, além de dificultar operações de mistura, bombeamento e aplicação. Adicionalmente, sua presença pode introduzir descontinuidades no compósito, contribuindo para um comportamento menos uniforme do material.

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica analítica que se baseia na absorção de radiação eletromagnética na região do infravermelho médio (4000 a 400 cm^{-1}). Esta técnica permite analisar os diferentes tipos de ligações e funções químicas nas moléculas contidas nas amostras, em especial moléculas orgânicas, apresentando picos relacionados a vibrações

(estiramentos e deformações). É utilizada na análise do ligante asfáltico para determinar níveis de oxidação, bem como determinar de maneira qualitativa e/ou semi-quantitativa a presença de aditivos orgânicos.

O ensaio de FTIR foi realizado para a amostra contendo a borracha, e seu espectro está disposto na Figura 26. A borracha, produto comercial, possui composição complexa e vasta, podendo conter polímeros e copolímeros de origem natural e sintética, bem como vários aditivos desde carvão dentre outras resinas. Com isso, a presença de vários picos de diversas funções orgânicas é esperada num espectro de infravermelho.



Quanto a caracterização da borracha, os principais sinais indicativos da sua composição estão presentes em regiões com picos de alta intensidade, referentes a estiramentos (ou deformações axiais) de grupos alifáticos saturados em 2908 cm^{-1} e 2842 cm^{-1} - para estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metileno ($-\text{CH}_2$) - comuns em vários compostos orgânicos (hidrocarbonetos num geral). Os picos em 2348 e 2083 cm^{-1} são referentes as vibrações em espécies como CO_2 e $\text{C}=\text{C}=\text{C}$ (alenos), respectivamente, e que podem ser correlacionados com aditivos (carvão) ou com os polímeros elastoméricos. A presença de um pico em torno de 1739 cm^{-1} é indicativa de grupos carbonilas ($\text{C}=\text{O}$)

para ésteres ou ácidos carboxílicos, bem como a presença de um pico em 1535 cm^{-1} , para carboxilatos, que podem ser de compostos aditivos como poliésteres e fibras.

Os picos entre $1000\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$, referentes a ligações C-O, também estão relacionadas a estas funções orgânicas, bem como para outras funções que possuem este tipo de ligação (C-O). Vale salientar a presença, com intensidade moderada, de uma banda entre $3100\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$, referente a ligações O-H, que podem indicar uma presença de ácidos carboxílicos ou álcoois, relacionados a aditivos e/ou oxidação de componentes. Os picos em torno de 1426 e 1365 cm^{-1} , referentes à deformação angular de grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) e metila ($-\text{CH}_3$), respectivamente, estão em conformidade com os picos destes grupos para deformação axial (2908 e 2842 cm^{-1}). Por fim, os picos em torno de $900\text{-}800\text{ cm}^{-1}$ são correspondentes às ligações C-H em grupos ligados à insaturações e o pico em 671 cm^{-1} é referente a vibração do tipo “*rocking*” para cadeias saturadas longas, $-(\text{CH}_2)_n-$, com $n \geq 4$, provavelmente dos polímeros.

Estudos realizados por Lima (2008), indicaram uma maior intensidade das bandas referentes à carbonilas (C=O) na região de 1600 a 1700 cm^{-1} , e o aparecimento de novas bandas em aproximadamente 950 , 1160 , 1650 e em 1740 cm^{-1} , que podem ser atribuídas a reações químicas entre o ligante asfáltico e os componentes químicos da borracha de pneu. As regiões de 950 e 1160 cm^{-1} obtidas no estudo, podem ser atribuídas a deformações axiais entre carbonos da borracha ou do ligante asfáltico com o enxofre proveniente dos grupamentos sulfóxidos (S=O), formando compostos tiocarbonilados (C=S) e em 1650 cm^{-1} pode ser atribuído a carbonila de aldeído.

3.1.3. Ligante asfáltico 50/70

No desenvolvimento desta pesquisa, foi empregado como ligante asfáltico o CAP 50/70, fornecido pela empresa CBAA Asfaltos LTDA. Trata-se de um ligante asfáltico convencional, classificado com base em sua faixa de penetração, expressa em décimos de milímetro, parâmetro amplamente utilizado para representar sua consistência e sua sensibilidade às variações de temperatura, refletindo indiretamente o comportamento reológico do material em condições de serviço. O Quadro 2 apresenta os ensaios realizados para a caracterização do ligante virgem, assim como suas respectivas normas.

Quadro 2: Normas para caracterização física e reológica do ligante CAP 50/70

Ensaio	Norma/Procedimento
Viscosidade rotacional	ASTM D4402/D4402M: 2015
Determinação da penetração 0,1 mm	ASTM D5/D5M: 2020
Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola	ASTM D36/D36M – 14: 2020
Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional - RTFOT	NBR 15235/2009
Grau de desempenho de ligante asfáltico - <i>Performance Graded Asphalt Binder</i>	ASTM D6373/2023

<i>Multiple Stress Creep Recovery – MSCR</i>	ASTM D7405:2020
Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (<i>LAS – Linear Amplitude Sweep</i>)	DNIT 439/2022 - ME

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Foi realizada a caracterização física e reológica do ligante CAP 50/70, antes e após o envelhecimento de curto prazo, realizado por meio do ensaio *Rolling Thin Film Oven* (RTFO). A caracterização física compreende os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e recuperação elástica, enquanto a caracterização reológica inclui a viscosidade rotacional e os parâmetros determinados por meio do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). Adicionalmente, são apresentadas as especificações normativas aplicáveis ao ligante de referência, bem como os critérios de desempenho estabelecidos pela AASHTO M 323 (2023) para a avaliação do comportamento à deformação permanente por meio do ensaio MSCR. A Tabela 4 apresenta as nomenclaturas utilizadas para identificar as amostras de ligante asfáltico no decorrer do trabalho.

Tabela 4: Nomenclatura empregada para identificação das amostras

Amostra	Nomenclatura
CAP 50/70 virgem	AV
CAP 50/70 modificado 5 % de borracha	AB 5
CAP 50/70 modificado 10% de borracha	AB 10
CAP 50/70 modificado 15% de borracha	AB 15

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

3.2. MÉTODOS

Neste tópico, são apresentados, de forma sistemática, os procedimentos utilizados para conduzir a pesquisa e assegurar a consistência e a reprodutibilidade dos resultados. Inicialmente, descrevem-se o delineamento experimental e os critérios adotados para a seleção dos materiais, definição das composições e estabelecimento das condições de ensaio. Em seguida, detalham-se as etapas de dosagem, produção, moldagem e condicionamento dos corpos de prova, bem como as rotinas de controle tecnológico aplicadas ao longo do processo. Na sequência, são especificados os ensaios empregados para caracterização e avaliação de desempenho, com indicação das variáveis de carregamento e temperatura, dos parâmetros obtidos e do procedimento de aquisição e tratamento dos dados. Por fim, apresenta-se a abordagem de análise e comparação dos resultados, incluindo os indicadores utilizados e os critérios empregados para interpretação, fornecendo o suporte necessário para as discussões desenvolvidas nos capítulos subsequentes.

3.2.1. Modificação do Ligante asfáltico 50/70

Os teores de borracha utilizados nos testes de modificação do ligante para a definição do teor de projeto foram baseados nos estudos de Nunes (2017). Embora a pesquisa de referência tenha adotado teores de borracha de 10%, 15% e 20% na modificação do ligante asfáltico, neste estudo optou-se pela utilização de teores de 5%, 10% e 15%.

Essa escolha teve como objetivo ampliar a análise para um nível inicial de modificação, permitindo avaliar os efeitos da incorporação de borracha em teores mais baixos, frequentemente associados a melhor trabalhabilidade e menor incremento de rigidez, assim como propor um teor ótimo de projeto para o decorrer da pesquisa. Ressalta-se que o teor de 20% de borracha foi avaliado em etapa preliminar; entretanto, verificou-se que esse teor resultou em um ligante com rigidez excessiva, condição que poderia comprometer a homogeneização e a aplicabilidade do material no programa experimental, motivo pelo qual não foi considerado nas análises subsequentes. A proporção de materiais utilizados no processo de modificação está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Proporção dos materiais utilizados na modificação

Amostra	CAP 50/70	Borracha
AB 5	95%	5%
AB 10	90%	10%
AB 15	85%	15%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

O processo de modificação do ligante asfáltico foi realizado em laboratório, por meio da incorporação gradual de borracha de pneus ao ligante base previamente aquecido à 150 °C. A modificação ocorreu sob temperatura controlada de 165 °C, utilizando-se um agitador mecânico FISATOM, modelo 72, ilustrado na Figura 27, operando com frequência entre 550 e 750 rpm, de modo a assegurar adequada homogeneização e interação entre os constituintes.

Figura 27: Agitador mecânico



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A borracha foi previamente fracionada em três porções iguais em massa, as quais foram adicionadas de forma gradual ao ligante aquecido (10 minutos para cada porção de borracha), permitindo uma incorporação progressiva e favorecendo a interação entre os constituintes. Após cada adição, manteve-se a agitação contínua por mais 30 minutos, permitindo o início dos processos de inchamento das partículas de borracha e de interação físico-química com as frações leves do ligante.

O tempo total de modificação foi de 1 h para cada amostra, contado a partir da adição da primeira fração de borracha, mantendo-se constantes as condições de temperatura e rotação ao longo de todo o processo. Esse procedimento foi adotado com o objetivo de garantir a reprodutibilidade do ligante modificado, bem como a obtenção de um material com características homogêneas e estáveis, adequado às etapas subsequentes de caracterização física e reológica.

Após a etapa de modificação do ligante asfáltico, procedeu-se à caracterização física e reológica de cada amostra, com o objetivo de avaliar os efeitos da incorporação da borracha sobre suas propriedades. Para essa finalidade, foram realizados os ensaios de caracterização listados no Quadro 3, conduzidos de acordo com as respectivas normas técnicas vigentes, abrangendo parâmetros físicos tradicionais e propriedades reológicas do ligante. Essa etapa permitiu a verificação da conformidade dos materiais produzidos e forneceu subsídios para a análise comparativa entre os diferentes teores de borracha avaliados assim como para a escolha do teor ótimo de projeto.

Quadro 3: Normas para caracterização física e reológica das amostras modificadas

Ensaio	Norma/Procedimento
Viscosidade rotacional	ASTM D4402/D4402M: 2015
Determinação da penetração 0.1 mm	ASTM D5/D5M: 2020
Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola	ASTM D36/D36M – 14: 2020
Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro	DNIT 130/2010 - ME
Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional - RTFOT	NBR 15235/2009
Grau de desempenho de ligante asfáltico - <i>Performance Graded Asphalt Binder</i>	ASTM D6373/2023
Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinado sob tensões múltiplas (MSCR)	DNIT 423/2020 - ME
Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep)	DNIT 439/2022 - ME
Estabilidade ao armazenamento de ligantes modificados por polímero	DNIT 384/2022 - ME

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Após a realização dos ensaios de caracterização física e reológica e a análise dos resultados obtidos, foi selecionada a amostra de ligante asfáltico modificado AB 10 para as etapas subsequentes do programa experimental. Essa escolha foi realizada levando-se em consideração a *compatibilidade dos parâmetros físicos e reológicos com as especificações para ligantes modificados com borracha

estabelecidas na NORMA DNIT 111/2009 – EM, bem como o equilíbrio entre consistência, trabalhabilidade e estabilidade do material. Dessa forma, a amostra AB 10 apresentou comportamento adequado para sua aplicação nas fases posteriores da pesquisa, atendendo aos requisitos técnicos e normativos exigidos para ligantes modificados com borracha.

3.2.2. Escolha da faixa granulométrica das misturas

A etapa de escolha da composição granulométrica das misturas foi conduzida com o objetivo de avaliar a influência da estrutura granulométrica no desempenho das misturas asfálticas produzidas com ligante modificado com borracha. Para a pesquisa em questão, foram adotadas duas faixas granulométricas padronizadas pela NORMA DNIT 112/2009 – ES: uma faixa contínua (Faixa B) e uma faixa descontínua do tipo gap-graded.

A utilização das duas configurações permitiu a comparação entre uma estrutura granulométrica tradicional, caracterizada por distribuição contínua dos agregados, e uma estrutura descontínua, associada a maior intertravamento do esqueleto pétreo e potencial melhoria da resistência à deformação permanente. Ambas foram produzidas utilizando o ligante asfáltico modificado com borracha AB 10.

A NORMA DNIT 112/2009 – ES estabelece, além do enquadramento granulométrico, o atendimento a parâmetros técnicos mínimos de desempenho, os quais devem ser verificados durante a etapa de dosagem e validação das misturas. Esses parâmetros incluem percentual de vazios, relação betume/vazios, estabilidade Marshall e resistência à tração por compressão diametral, conforme os métodos de ensaio e os valores mínimos especificados. O Quadro 4 apresenta as especificações e normativas aplicáveis às camadas de rolamento com granulometria contínua (Faixa B) e descontínua (gap-graded), os quais foram adotados como referência para a seleção e validação das composições granulométricas utilizadas nesta pesquisa.

Quadro 4: Especificações aplicáveis às camadas de rolamento com asfalto borracha

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Rolamento Gap Graded
Porcentagem de vazios (%)	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	65-78	65-78
Estabilidade mínima, (Kgf)	DNER-ME 043	800	700
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25 °C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,75	0,50

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

3.2.3. Dosagem das misturas asfálticas

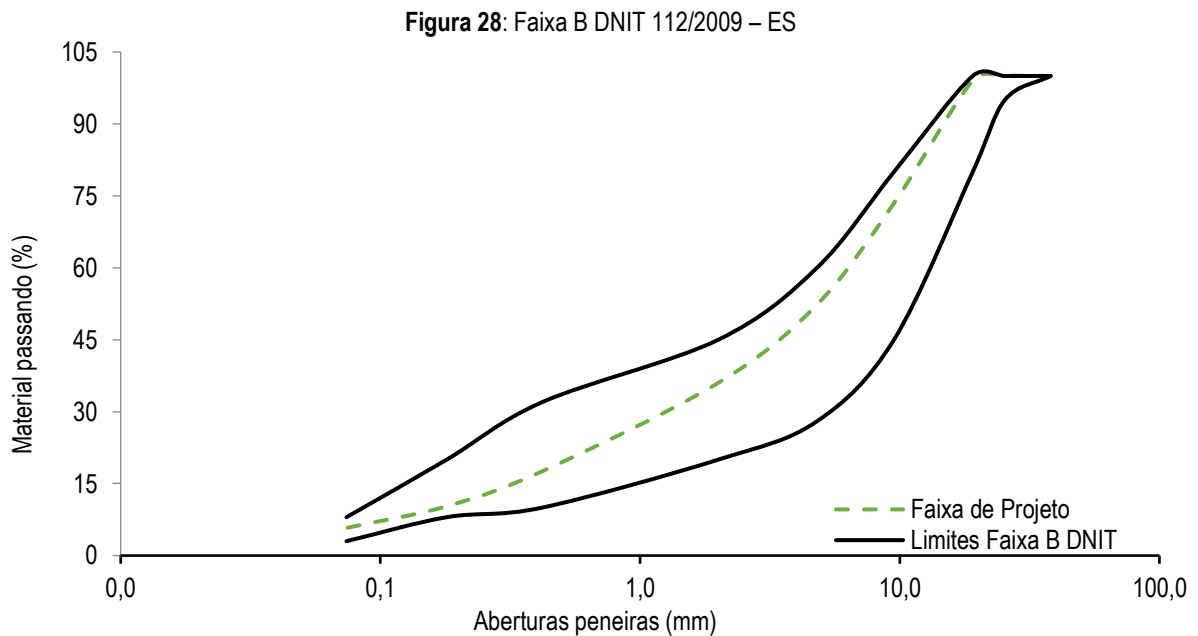
A partir das curvas granulométricas dos agregados obtidas na etapa de caracterização dos materiais e das faixas granulométricas limites, estabelecidas pela NORMA DNIT 112/2009 – ES para

cada tipo de mistura, procedeu-se o enquadramento das curvas granulométricas das misturas. Esse procedimento consistiu no ajuste das proporções dos agregados de modo que a curva resultante permanecesse integralmente contida entre os limites inferior e superior especificados para a Faixa B (granulometria contínua) e para a mistura do tipo gap-graded (granulometria descontínua). As proporções dos agregados adotadas para o enquadramento granulométrico de cada mistura encontram-se detalhadas na Tabela 6, a qual serviu de base para as etapas subsequentes da dosagem e processo de mistura. As curvas granulométricas finais obtidas para cada composição são apresentadas na Figura 28 e na Figura 29, respectivamente.

Tabela 6: Proporção dos agregados utilizados nas misturas

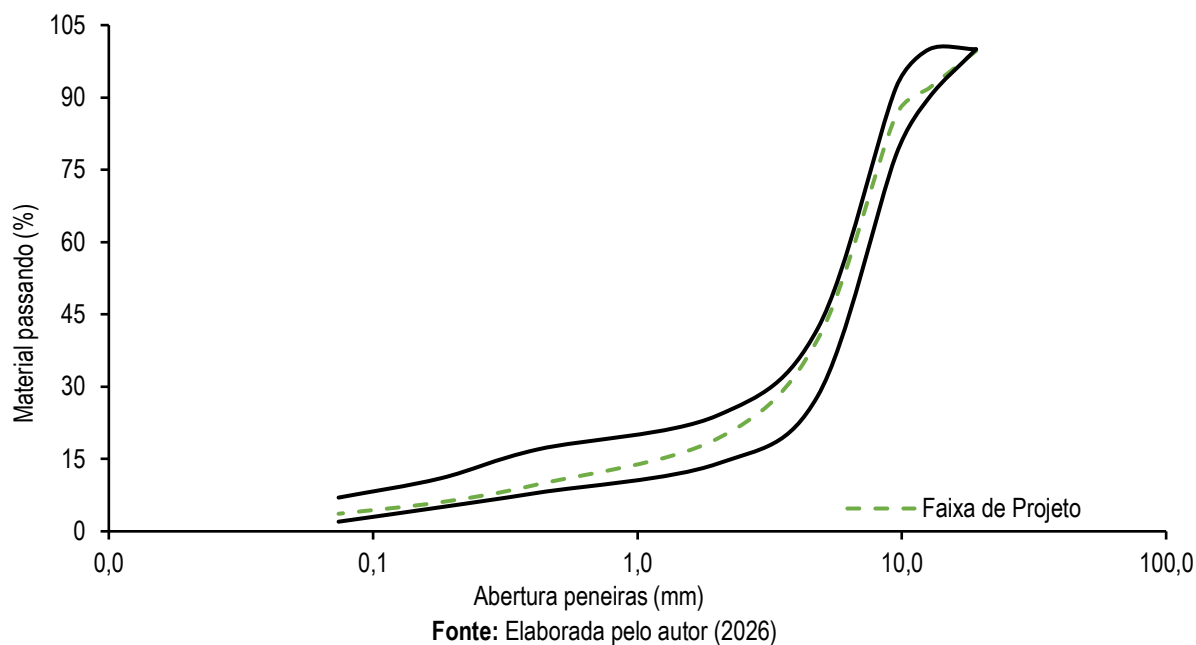
Faixas Granulométricas	Brita 19	Brita 12,5	Pó de pedra	Filler
Faixa B	25%	30%	44%	1%
Faixa Gap Graded	10%	67%	22%	1%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 29: Faixa Gap Graded DNIT 112/2009 – ES



O volume de vazios de projeto (V_v) adotado para as misturas asfálticas foi definido com base nos limites estabelecidos pela NORMA DNIT 112/2009 – ES, sendo selecionados valores intermediários aos intervalos especificados para cada tipo de composição granulométrica. Para a mistura Faixa B, foi adotado um volume de vazios de projeto de 4%, enquanto para a mistura de granulometria descontínua do tipo gap-graded foi adotado um volume de vazios de projeto de 5%. Esses valores foram escolhidos de modo a assegurar adequado equilíbrio entre durabilidade e resistência mecânica das misturas.

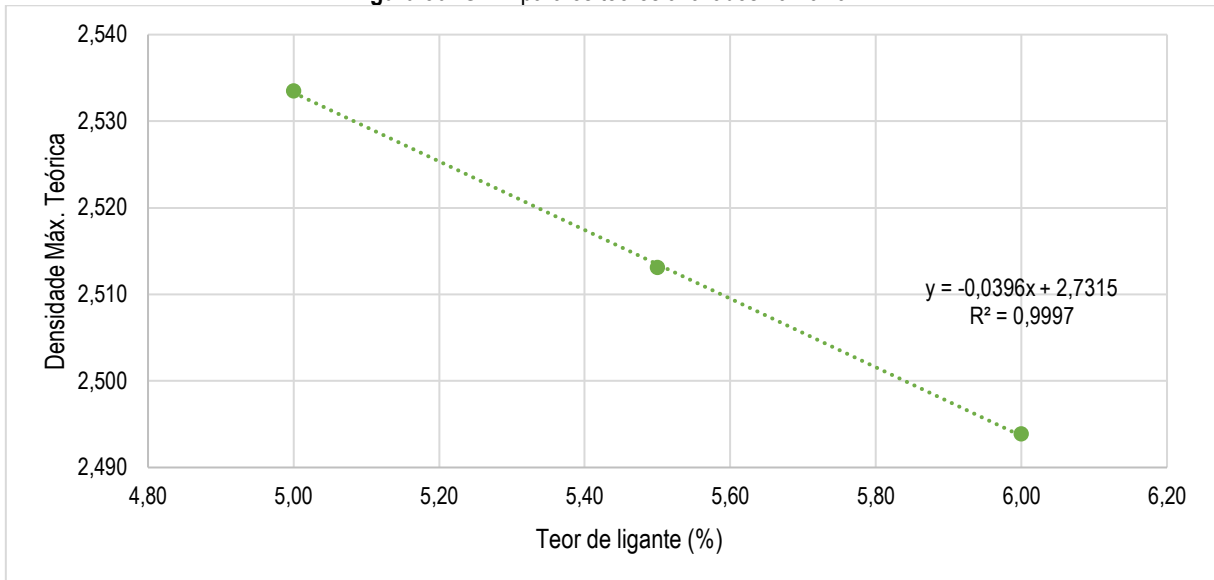
Após a definição do volume de vazios de projeto, os teores de ligante foram estabelecidos com base nos limites normativos do DNIT 112/2009, que especifica para a Faixa B o intervalo de 4,5% a 7,5% de asfalto solúvel (CS_2) e, para a faixa descontínua (gap-graded), o intervalo de 5,0% a 8,0%, com tolerância máxima de $\pm 0,3\%$. Assim, foram selecionados três teores em cada dosagem com incremento de 0,5%, visando abranger (*bracketing*) o teor ótimo e permitir a avaliação da sensibilidade dos parâmetros volumétricos e de desempenho. Para a Faixa B adotaram-se 5,0%, 5,5% e 6,0%, enquanto para a gap-graded foram testados 6,0%, 6,5% e 7,0%, valores compatíveis com a maior demanda de mástique/recobrimento típica de graduações descontínuas e integralmente contidos nos limites estabelecidos em norma.

Para cada teor de ligante avaliado, em ambas as dosagens, foram confeccionados três corpos de prova, a partir dos quais foram determinados os parâmetros volumétricos correspondentes, conforme apresentados anteriormente no Quadro 4. A densidade máxima teórica da mistura (G_{mm}) foi obtida por meio da realização do ensaio de Rice, seguindo o procedimento descrito na norma ASTM D2041. Realizou-se dois ensaios para cada teor avaliado em cada dosagem e a média dos resultados de densidade foram apresentados na Tabela 7 e a correlação entre os valores de G_{mm} nas Figuras 30 e 31.

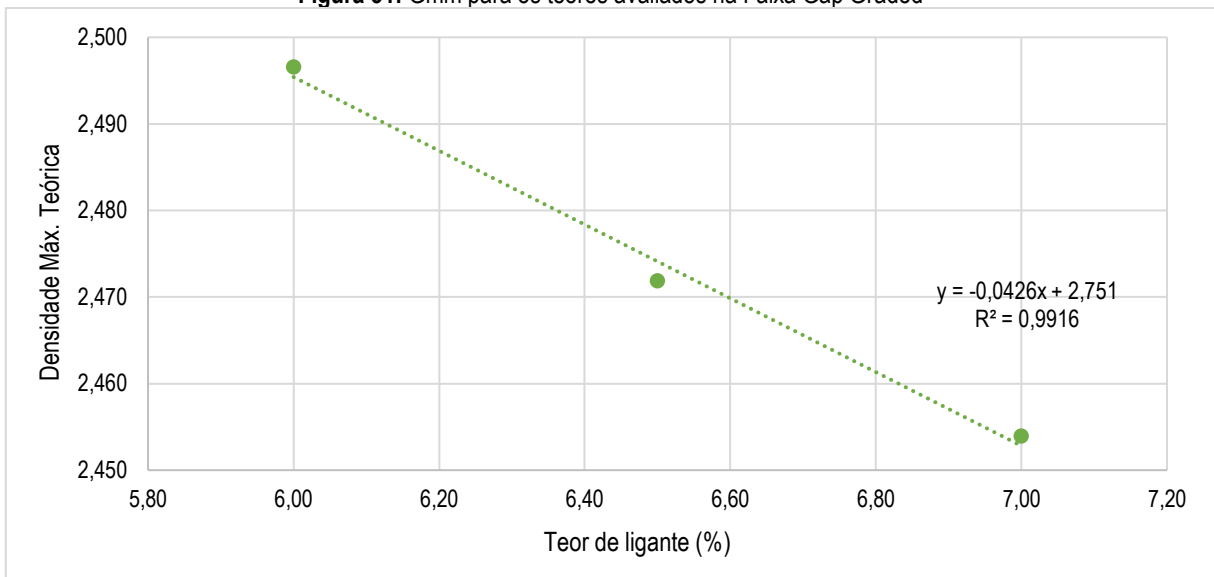
Tabela 7: Gmm para os teores avaliados

Faixa B			
Teor de Ligante (%)	5,0	5,5	6,0
Gmm	2,533	2,513	2,494
Faixa Gap Graded			
Teor de Ligante (%)	6,0	6,5	7,0
Gmm	2,497	2,472	2,454

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 30: Gmm para os teores avaliados na Faixa B

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 31: Gmm para os teores avaliados na Faixa Gap Graded

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Os coeficientes de determinação obtidos (R^2 Faixa B = 0,9997 e R^2 Gap-graded = 0,9916) apresentam valores elevados e próximos da unidade, evidenciando o bom ajuste do modelo linear adotado e, conseqüentemente, a confiabilidade dos resultados estimados para ambas as composições

granulométricas. Após a obtenção da G_{mm} para os teores descritos anteriormente das dosagens Faixa B e Gap Graded, foram moldados 3 corpos de prova para cada teor por meio da compactação giratória, utilizando a quantidade de 100 Giros. Após a moldagem foram aferidos os parâmetros volumétricos. As Tabelas 8, 9 e 10 apresentam os resumos dos valores obtidos no procedimento para a dosagem Faixa B, onde o mesmo procedimento foi realizado para a Faixa Gap Graded.

Tabela 8: Parâmetros volumétricos teor de 5,0 % Faixa B
Faixa B TEOR 5,0 %

Teor de Ligante do Grupo (%)		5,00			
Gmm - obtido a partir do Rice Test		2,533			
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS			Média
		CP1	CP2	CP3	
Massa Seca -MS (g)	-	1201.8	1201.5	1201.4	-
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	702.22	702.05	701.25	-
Massa Saturado Superfície Seca - MS SSS(g)	-	1205.1	1205.5	1204.7	
Densidade Aparente - Gmb	$MS / (MS\ SSS - Ms\ sub)$	2.384	2.381	2.380	2.382
Volume de Vazios -Vv	$(1 - (Gmb / Gmm)) * 100$	5.9	6.0	6.0	5.967
Vazios com Betume - VCB	$(Gmb * Teor\ de\ lig) / 1,027$	11.61	11.59	11.59	11.597
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$Vv + VCB$	17.49	17.60	17.61	17.567
Relação Betume/Vazios -RBV	$(VCB / VAM) * 100$	66.36	65.87	65.79	66.007

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Tabela 9: Parâmetros volumétricos teor de 5,5 % Faixa B
Faixa B TEOR 5,5 %

Teor de Ligante do Grupo (%)		5,50			
Gmm - obtido a partir do Rice Test		2,513			
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS			Média
		CP1	CP2	CP3	
Massa Seca -MS (g)	-	1201.44	1200.84	1201.4	-
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	706.99	708.15	709.71	-
Massa Saturado Superfície Seca - MS SSS(g)	-	1205.22	1204.58	1207.13	
Densidade Aparente - Gmb	$MS / (MS\ SSS - Ms\ sub)$	2.405	2.413	2.409	2.409
Volume de Vazios -Vv	$(1 - (Gmb / Gmm)) * 100$	4.3	4.0	4.1	4.133
Vazios com Betume - VCB	$(Gmb * Teor\ de\ lig) / 1,027$	12.88	12.92	12.90	12.900
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$Vv + VCB$	17.17	16.91	17.03	17.037
Relação Betume/Vazios -RBV	$(VCB / VAM) * 100$	75.04	76.43	75.74	75.737

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Tabela 10: Parâmetros volumétricos teor de 6,0 % Faixa B
Faixa B TEOR 6,0 %

DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	CP1	CP2	CP3	Média
-----------	---------	-----	-----	-----	-------

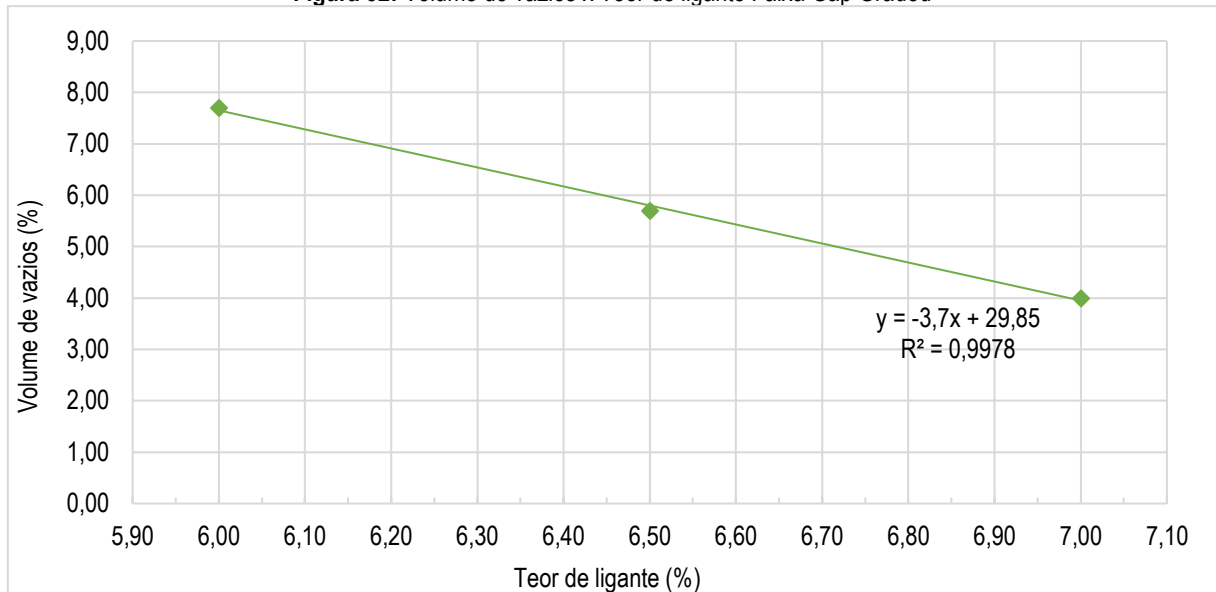
Teor de Ligante do Grupo (%)		6,00			
Gmm - obtido a partir do Rice Test		2,494			
					Média
DESCRIÇÃO	RELAÇÃO	RESULTADOS			
		CP1	CP2	CP3	
Massa Seca -MS (g)	-	1201.07	1201.05	1201.2	-
Massa Submersa - Ms sub (g)	-	709.77	710.26	709.45	-
Massa Saturado Superfície Seca - MS SSS(g)	-	1202.82	1202.27	1202.37	
Densidade Aparente - Gmb	$MS / (MS\ SSS - Ms\ sub)$	2.430	2.435	2.431	2.432
Volume de Vazios -Vv	$(1 - (Gmb / Gmm)) * 100$	2.6	2.4	2.5	2.500
Vazios com Betume - VCB	$(Gmb * Teor\ de\ lig) / 1,027$	14.20	14.23	14.20	14.210
Vazios do Agregado Mineral - VAM	$Vv + VCB$	16.76	16.59	16.73	16.693
Relação Betume/Vazios -RBV	$(VCB / VAM) * 100$	84.70	85.77	84.89	85.120

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A análise dos resultados indicou que o teor de ligante de 5,5% foi o que atendeu integralmente aos parâmetros volumétricos de projeto estabelecidos. Nessas condições, a mistura apresentou um volume de vazios médio de aproximadamente 4,1%, um valor médio de vazios do agregado mineral (VAM) em torno de 17,0% e uma relação betume/vazios (RBV) próxima de 75,7%, valores compatíveis com os limites normativos e adequados ao desempenho esperado da mistura. Dessa forma, o teor de 5,5% foi definido como teor ótimo de ligante para a composição da Faixa B analisada. Para a dosagem da Faixa Gap Graded foram realizados os mesmos procedimentos para os teores de 6, 6,5 e 7 % de ligante, onde após a análise dos resultados, observou-se que o teor ótimo para essa composição se encontrava entre 6,5 e 7%.

Diante desse contexto, foi elaborado o gráfico de Teor de Ligante versus Volume de Vazios, a partir do qual se verificou que o teor ótimo de ligante para a mistura do tipo gap-graded corresponde a aproximadamente 6,7%. Esse valor, identificado pela interseção com o volume de vazios de projeto, encontra-se representado na Figura 32 e foi adotado como teor ótimo de projeto para essa faixa granulométrica. Na Tabela 11 é apresentado um resumo dos parâmetros volumétricos determinados nos ensaios realizados com os teores ótimos de ligante definidos para ambas as dosagens analisadas.

Figura 32: Volume de vazios x Teor de ligante Faixa Gap Graded



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Tabela 11: Parâmetros volumétricos obtidos para os teores de projeto de cada mistura

Mistura	Teor de ligante (%)	%Gmm	VAM (%)	VV (%)	RBV (%)	Massa específica máxima medida (g/cm³)
Faixa B	5,5	95,8	16,7	4,1	75,7	2.513
Faixa Gap Graded	6,7	94,7	20,5	5,3	74,4	2.469

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Após a definição dos teores ótimos de ligante de projeto e a verificação do atendimento aos parâmetros volumétricos especificados, deu-se início à etapa de produção das misturas asfálticas e moldagem dos corpos de prova. Esse procedimento teve como finalidade a obtenção de amostras representativas, confeccionadas sob condições controladas, para a posterior realização dos ensaios mecânicos, permitindo a avaliação do comportamento estrutural e do desempenho das misturas desenvolvidas.

3.2.4. Mistura e moldagem dos corpos de prova

Para o processo de mistura dos materiais, os agregados graúdos e miúdos, assim como o ligante asfáltico, foram submetidos previamente a aquecimento em estufa, respeitando-se as temperaturas de usinagem definidas para cada material. As temperaturas de aquecimento do ligante e dos agregados foram definidas a partir de um critério de trabalhabilidade do material, buscando assegurar a viscosidade adequada do ligante para recobrimento dos agregados e a manutenção da temperatura da massa asfáltica durante mistura e moldagem. Considerando a maior viscosidade e sensibilidade térmica do ligante modificado com borracha, adotou-se 170 °C para o ligante e 190 °C para os agregados, de forma

que, após o contato entre fases, a temperatura efetiva da mistura permanecesse na faixa de usinagem, minimizando perdas térmicas e garantindo homogeneização e recobrimento.

A etapa de mistura foi realizada com o auxílio de um misturador mecânico vertical da marca InfraTest Testing Systems, empregado para promover a homogeneização dos constituintes, minimizar a segregação e assegurar a manutenção da temperatura ao longo do processo de moldagem. O equipamento utilizado permite o controle térmico em uma faixa de 25 °C a 260 °C e apresenta capacidade de processamento de até 15 kg de material por ciclo.

Concluída a mistura dos materiais, a massa asfáltica foi separada cuidadosamente para que não houvesse segregação do material, pesada e transferida para recipientes metálicos e, em seguida, acondicionada em estufa à temperatura de compactação de 160 °C, adotada para ambas as misturas, mantendo-se uma tolerância máxima de ± 3 °C, conforme estabelecido pela DNIT 178/2018-PRO. Ressalta-se que a temperatura de compactação de 160 °C foi estabelecida combinando-se o procedimento normativo de controle térmico e o conhecimento prático de campo empregado em usinagem e execução, visando garantir trabalhabilidade e densificação consistentes. Em laboratório, essa escolha foi verificada pela obtenção de corpos de prova com densidade e volumetria dentro dos limites de projeto, sem indícios de segregação ou exsudação. As amostras permaneceram em estufa por um período de duas horas, etapa correspondente ao condicionamento de curto prazo, cujo objetivo é reproduzir, em laboratório, os efeitos iniciais do envelhecimento do ligante asfáltico antes da compactação.

Concluída a etapa de condicionamento, os corpos de prova foram moldados por meio do Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), modelo Servopac IPC (Figura 33), adotando-se diâmetro nominal de 100 mm, conforme definido para o presente estudo. A compactação foi realizada de forma servo-controlada e automatizada, resultante da atuação simultânea da compressão estática e do cisalhamento induzido pela rotação do molde em torno de seu eixo longitudinal, com inclinação angular previamente estabelecida. O equipamento permite o controle da velocidade de rotação, da tensão axial aplicada e do ângulo de giro, assegurando conformidade com as normas nacionais e internacionais de compactação giratória.

Figura 33: Compactador giratório SERVOPAC IPC

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A massa utilizada na compactação e o número de giros são ajustados de modo a atingir os valores de volume de vazios e as alturas especificadas, os quais variaram em função do tipo de ensaio mecânico a ser realizado, atendendo aos requisitos específicos de cada procedimento experimental. A Tabela 12 apresenta os parâmetros utilizados como referência para o cálculo da massa dos corpos de prova empregados em cada ensaio.

Tabela 12: Parâmetros geométricos e volumétricos dos corpos de prova FB e GG por tipo de ensaio

Ensaio	Dimensões do CP (mm)	Quantidade de réplicas	Volume de Vazios Vv FB/GG (%)	Tolerância Vv (%)
Resistência à Tração - RT	Variável	3	4,00	1,0
Módulo de Resiliência - MR	Variável	3	4,00	1,0
Estabilidade Marshall - EM	Variável	3	4,00	1,0
Dano por umidade induzida - DUI	Variável	6	7,00	0,5
Módulo Dinâmico - MD	100x150	3	5,50	0,5
Resistência à deformação permanente - FN	100x150	3	7,00 / 8,00	0,5
Fadiga à tração direta uniaxial - TD	100x130	3	5,50 / 6,50	0,5
Stress Sweep Rutting - SSR	100x150	3	7,00 / 8,00	1,0

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

3.2.5. Ensaio mecânicos

A avaliação comparativa do desempenho das misturas asfálticas foi conduzida por meio da realização dos ensaios de resistência à tração, estabilidade Marshall, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, módulo dinâmico, resistência à deformação permanente (*Flow Number*), com destaque

para o ensaio de *Stress Sweep Rutting* (SSR), e resistência à fadiga por tração direta uniaxial. As misturas analisadas neste estudo corresponderam a uma mistura enquadrada na Faixa B e a uma mistura do tipo *gap-graded*, ambas produzidas com ligante asfáltico modificado com borracha AB 10, permitindo a investigação da influência da estrutura granulométrica no comportamento mecânico quando associado a um mesmo tipo de ligante. Os ensaios realizados, bem como as respectivas normas técnicas adotadas, encontram-se descritos no Quadro 5.

Quadro 5: Ensaios mecânicos realizados nas misturas

Ensaios	Norma/Procedimento
Determinação da resistência à tração por compressão diametral	DNIT 136/2018 – ME
Determinação do módulo de resiliência	ASTM D7369:2020
Ensaio de estabilidade Marshall	DNIT 447/2024 – ME
Determinação de dano por umidade induzida	DNIT 180/2018 – ME
Determinação do módulo dinâmico	DNIT 416/2019 – ME
<i>Stress Sweep Rutting</i>	AASHTO TP 134 – 22
Ensaio uniaxial de carga repetida - <i>Flow number</i>	AASHTO T 378-22
Fadiga por tração direta uniaxial	AASHTO T 400 – 23

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

3.2.6. Flow Number (FN)

O Flow Number (FN) é um parâmetro obtido no ensaio uniaxial de carga repetida realizado no AMPT e está associado à resistência da mistura à deformação permanente. Conforme o procedimento normalizado na AASHTO T 378-22, o FN é identificado a partir da curva de deformação permanente versus número de ciclos, sendo determinado no ponto em que ocorre a menor taxa de variação da deformação permanente (associada ao início do regime de escoamento acelerado), o que justifica seu uso como indicador de suscetibilidade ao Afundamento na Trilha de Rodas – ATR (*Rutting*).

No presente estudo, o ensaio de Flow Number (FN) foi realizado em compressão uniaxial sem confinamento, com tensão de contato de 600 kPa aplicada em pulsos repetidos, conforme o procedimento normativo adotado para avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas. O acompanhamento da deformação axial acumulada foi conduzido ao longo dos ciclos até o atendimento do critério de parada de 50.000 microdeformações ($\mu\epsilon$) estabelecido pelo DNIT para interrupção do ensaio.

Além disso, conforme recomendação normativa de que a moldagem dos corpos de prova considere o grau de compactação associado ao ensaio, os corpos de prova foram preparados visando atender ao grau de compactação de $97\% \pm 0,5\%$ em relação à densidade máxima teórica (Gmm) de cada mistura. Assim, não se adotou um mesmo teor de vazios (V_v) para ambas as dosagens, pois o V_v é consequência direta da volumetria de projeto e das características internas da mistura (VMA, teor de ligante e graduação), que diferem entre a Faixa B (V_v de projeto = 4%) e a *gap-graded* (V_v de projeto =

5%). Desse modo, mantendo-se o mesmo GC ($97\% \pm 0,5\%$) para as duas misturas e respeitando o Vv de projeto determinado para cada composição, os corpos de prova do ensaio de FN foram moldados com Vv = 7% para a mistura Faixa B e Vv = 8% para a mistura gap-graded, garantindo a condição volumétrica requerida para a avaliação da deformação permanente.

3.2.7. Stress Sweep Rutting (SSR)

O ensaio Stress Sweep Rutting (SSR) foi utilizado para avaliar a resistência das misturas asfálticas à deformação permanente, seguindo as diretrizes da AASHTO TP 134, com adaptações nas temperaturas de ensaio. O método baseia-se na aplicação de níveis crescentes de tensão desviadora, sob tensão confinante constante, permitindo acompanhar a evolução da deformação permanente acumulada em condições controladas de carregamento e temperatura.

Moldagem e caracterização volumétrica dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados em compactador giratório, com dimensões aproximadas de 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura (Figura 34), adotando-se como critério de controle o grau de compactação de $97\% \pm 0,5\%$ em relação ao Gmm, com ajuste do esforço de compactação (número de giros) até o atendimento desse alvo. Em função das particularidades volumétricas de cada graduação, foram adotados volumes de vazios de referência distintos:

- **Faixa B:** 7% de vazios, conforme alvo recomendado pela AASHTO TP 134;
- **Gap-graded:** 8% de vazios, como adaptação para manter a representatividade da estrutura interna típica dessas misturas, considerando sua relação característica entre vazios e grau de compactação.

Figura 34: Cilindro para moldagem dos corpos de prova



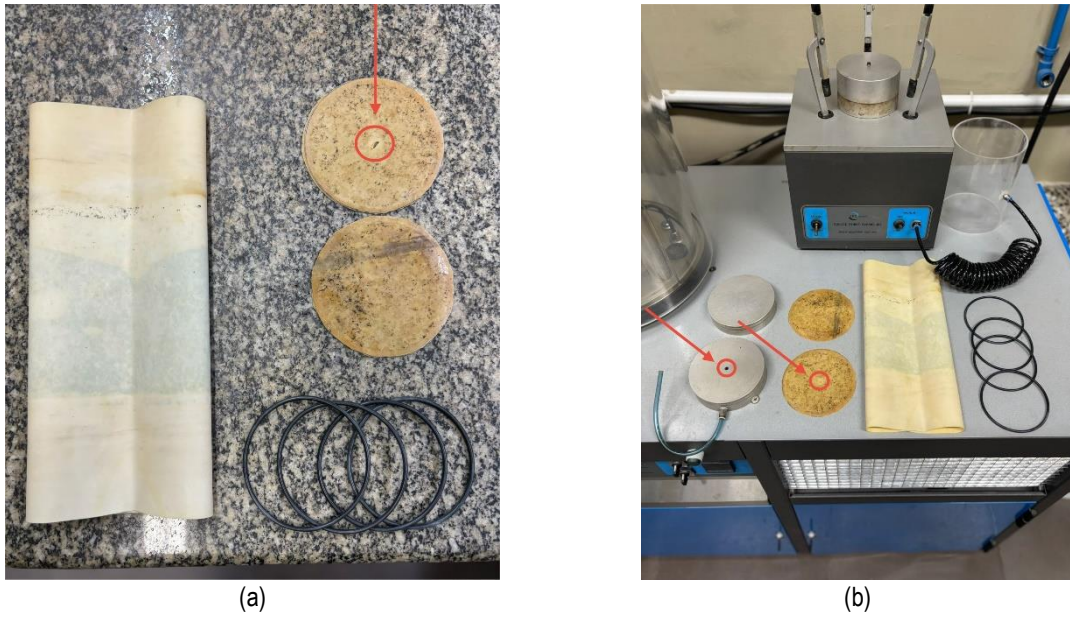
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Essa decisão buscou garantir que a comparação de desempenho ocorresse com corpos de prova compatíveis com o comportamento volumétrico esperado para cada composição granulométrica, visando garantir a representatividade da estrutura interna e a adequada resposta mecânica durante o ensaio. Essa adaptação foi realizada de modo a manter a coerência com as condições de compactação e com o comportamento volumétrico específico de cada composição granulométrica.

Preparação para ensaio em célula triaxial

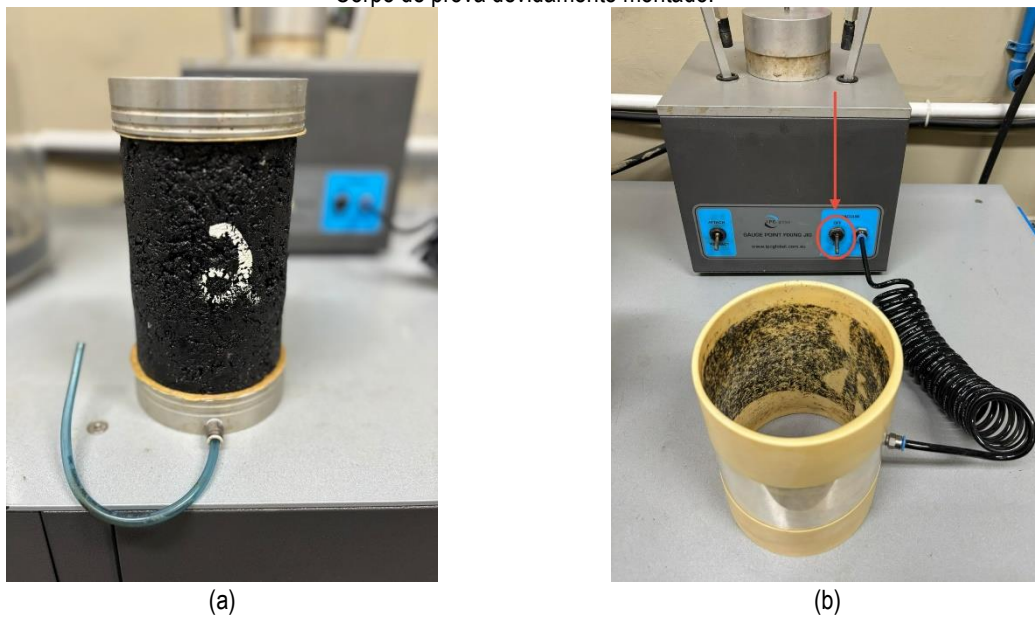
Para minimizar interferências de atrito nas interfaces durante o carregamento, foram utilizadas membranas cortadas com diâmetro de 100 mm e posicionadas nas faces do corpo de prova, sendo feito um furo no centro da membrana inferior de modo a preservar a drenagem central do sistema (Figura 35). Em seguida, as membranas para redução de atrito foram posicionadas nas partes inferior e superior do corpo de prova, tomando cuidado para posicionar a membrana com o furo para drenagem do ar do sistema na parte inferior da base, o corpo de prova também foi envolto com uma membrana externa e anéis para assegurar sua vedação, garantindo o confinamento do conjunto antes do início do ensaio, como representado na Figura 36. Após a montagem, foi realizada uma verificação operacional da vedação/drenagem por meio de pressurização controlada, de modo a identificar eventuais falhas de montagem (por exemplo, vedação deficiente, obstrução de drenagem ou danos em membrana).

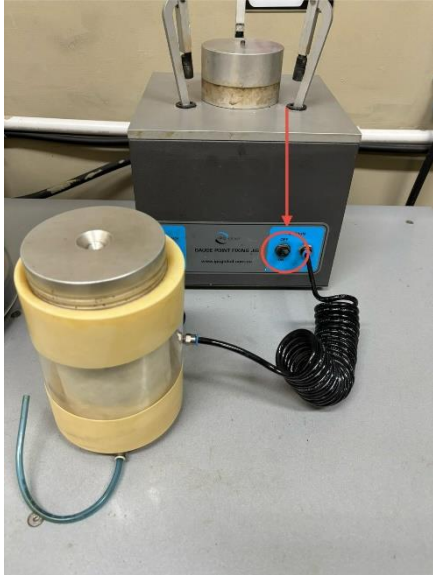
Figura 35: Preparação para o ensaio de SSR (a): Membrana com furo para drenagem do ar; (b): Posicionamento correto das membranas.



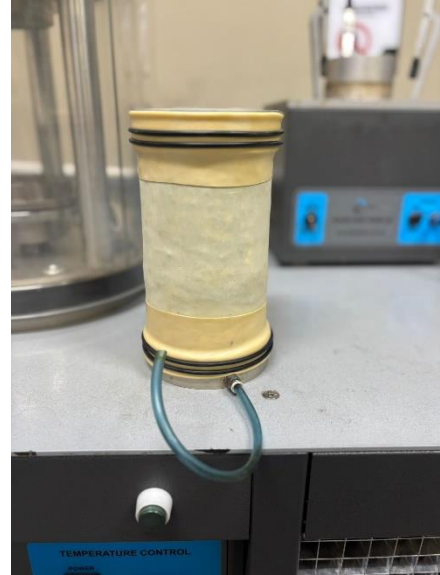
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 36: Montagem do corpo de prova para o ensaio de SSR (a): Posicionamento das membranas redutoras de atrito; (b): Aplicação de vácuo para posicionamento da membrana; (c): Posicionamento da membrana no corpo de prova; (d): Corpo de prova devidamente montado.





(c)



(d)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Condicionamento térmico e aplicação do confinamento

As avaliações foram conduzidas em duas condições térmicas:

- **Temperatura baixa (TL): 32 °C**
- **Temperatura alta (TH): 66 °C**

Antes do carregamento, cada corpo de prova permaneceu em pré-condicionamento por 20 minutos no equipamento AMPT (*Asphalt Mixture Performance Tester*), com o objetivo de estabilizar a temperatura no interior da câmara e simultaneamente aplicar a tensão confinante de 70 kPa, mantida constante ao longo de todo o ensaio (Figura 37 b). Esse condicionamento prévio foi essencial para reduzir gradientes térmicos e assegurar que a resposta mecânica registrada estivesse associada ao regime térmico-alvo.

Figura 37: Condicionamento do corpo de prova para o ensaio de SSR na AMPT (a): Equipamento AMPT; (b): Condicionamento do corpo de prova

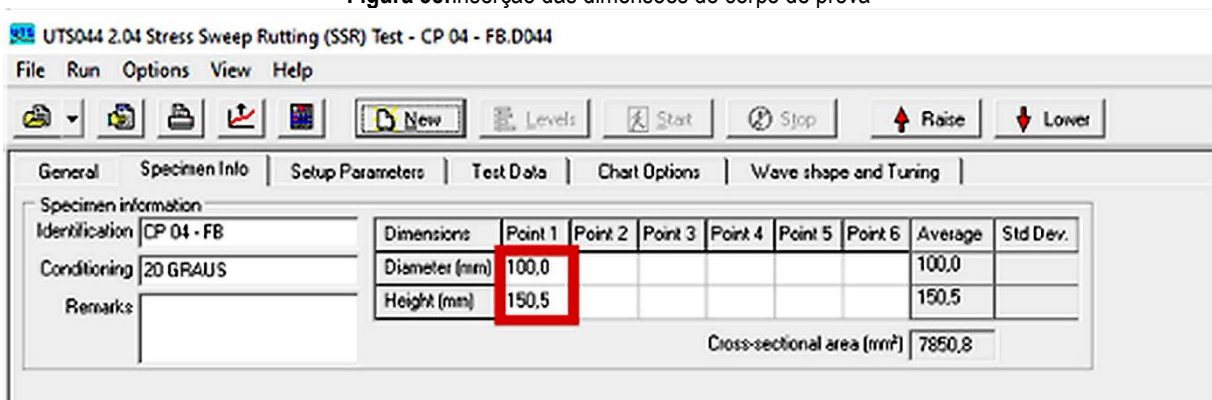


Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Sequência de carregamento e níveis de tensão

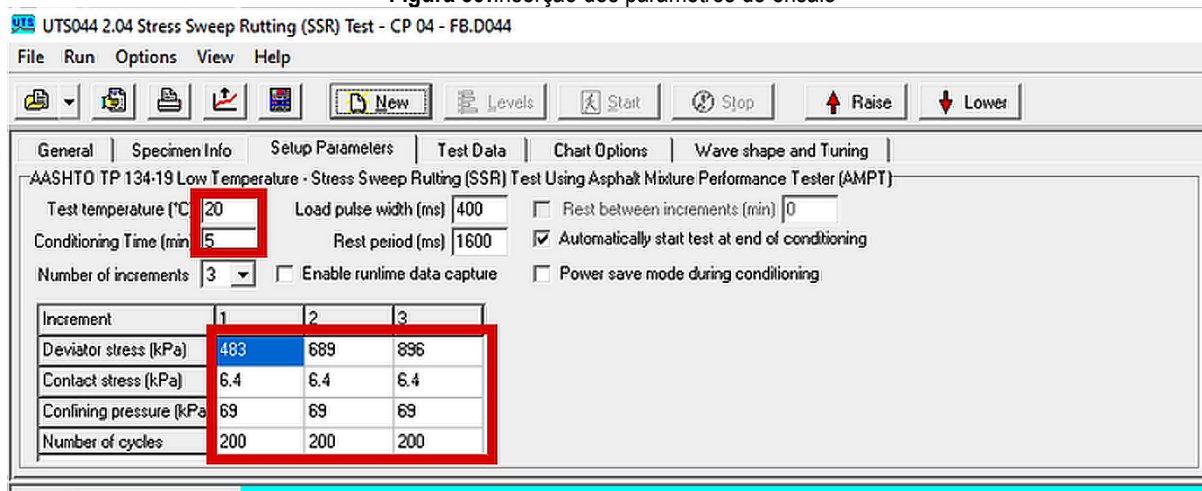
Em cada temperatura, aplicaram-se 600 ciclos de carregamento repetido, organizados em três blocos de tensão desviadora, com 200 ciclos por bloco. Na condição de temperatura baixa (32 °C), os níveis foram aplicados em ordem crescente: 483 kPa, 689 kPa e 896 kPa. Para a condição de temperatura alta (66 °C), adotou-se uma sequência com inversão dos dois primeiros níveis, iniciando em 689 kPa, seguido de 483 kPa, e finalizando em 896 kPa, conforme prática recomendada para a condição de maior suscetibilidade ao escoamento viscoplástico. As informações de dimensões do CP, temperatura, níveis de tensões, pulsos de carregamento e tempo de repouso, são inseridos na interface do programa da AMPT como representado nas Figuras 38 e 39.

Figura 38: Inserção das dimensões do corpo de prova



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 39: Inserção dos parâmetros do ensaio



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Os pulsos de carregamento foram definidos por um tempo de aplicação de 0,4 s, seguido por repouso para recuperação entre ciclos, sendo adotados 3,6 s na condição de temperatura alta e 1,6 s na condição de temperatura baixa, de acord. Essa diferença de repouso foi empregada para compatibilizar a dissipação das deformações e a estabilidade do registro experimental em cada regime térmico.

Medição da deformação permanente e tratamento dos resultados

A deformação permanente axial foi determinada a partir do deslocamento acumulado do atuador do equipamento AMPT registrado ciclo a ciclo, sendo convertida em deformação pela razão entre o deslocamento total e a altura inicial do corpo de prova. A partir das curvas de deformação ao longo dos ciclos e dos blocos de tensão, foi possível acompanhar a evolução da resposta viscoplástica e comparar, de forma consistente, a suscetibilidade das misturas ao acúmulo de deformação permanente sob diferentes combinações de temperatura e tensão desviadora. Os dados brutos do ensaio de SSR foram exportados da AMPT e inseridos na planilha do FlexMAT, na qual foi realizado o tratamento dos dados (processamento dos registros ciclo a ciclo, ajuste do modelo e consolidação dos parâmetros).

Com isso, o SSR forneceu uma base objetiva para identificar a progressão típica de deformação (com maior taxa inicial e posterior tendência a estabilização em regime secundário, quando aplicável) e para estabelecer comparações entre composições granulométricas e condições de ensaio, apoiando interpretações com enfoque mecanicista do desempenho à deformação.

3.2.8. Fadiga por tração direta uniaxial

O ensaio de fadiga por tração direta uniaxial cíclica foi conduzido de acordo com os procedimentos estabelecidos na AASHTO TP 107-18, consistindo na aplicação de uma tensão cíclica

senoidal de amplitude constante, com frequência de 10 Hz, diretamente sobre os corpos de prova de mistura asfáltica. A resposta mecânica do material foi acompanhada por meio da medição da deformação axial, obtida a partir de extensômetros do tipo LVDT acoplados à amostra. O critério de falha adotado baseia-se na redução do ângulo de fase, indicativa do avanço do dano por fadiga no material.

A validação do ensaio foi condicionada à ocorrência da macrotrinca na região central instrumentada, correspondente à faixa de medição dos LVDTs, usualmente com extensão aproximada de 70 mm. Ensaios nos quais a fratura ocorreu fora dessa região foram descartados, uma vez que, nessas condições, as deformações não são adequadamente registradas pelos sensores. Durante a execução do ensaio, foram monitorados e registrados parâmetros como módulo dinâmico, ângulo de fase, voltagem, deslocamento do atuador, deformação axial e temperatura de ensaio.

Os corpos de prova foram moldados em Compactador Giratório, com diâmetro de 100 mm e altura inicial de 170 mm, adotando-se volumes de vazios distintos conforme a estrutura granulométrica das misturas. Para as misturas enquadradas na Faixa B, os corpos de prova foram produzidos com 5,5% de vazios, enquanto para as misturas do tipo *gap-graded* foi adotado 6,5% de vazios, respeitando o grau de compactação das misturas. Após a moldagem, foram removidos 20 mm da extremidade superior e 20 mm da extremidade inferior, resultando em corpos de prova com altura final de 130 mm, procedimento adotado para garantir maior homogeneidade na distribuição do volume de vazios ao longo do corpo de prova.

Embora a homogeneização dos vazios também possa ser obtida por meio da extração de uma região axial específica, estudos anteriores indicam que a distribuição do volume de vazios ao longo do eixo central de corpos de prova cilíndricos apresenta comportamento aproximadamente uniforme. Assim, neste trabalho, optou-se por não realizar a extração da região axial central, preservando a integridade do corpo de prova após o corte das extremidades (WALUBITA et al., 2010; KOMBA et al., 2019).

Os ensaios foram realizados utilizando o equipamento *Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT), da marca IPC Global, equipado com célula de carga com capacidade de ± 15 kN, câmara de controle térmico e sistema de controle e aquisição de dados IMACS (*Integrated Multi-Axis Control System*). Esse sistema possibilitou o acompanhamento em tempo real dos parâmetros de carregamento, deformação medida pelos LVDTs, deslocamento do atuador, temperatura e demais variáveis relevantes ao ensaio.

Conforme prescrito na AASHTO TP 107-18, o ensaio foi conduzido à frequência de 10 Hz, sendo a temperatura de ensaio definida como a média entre as temperaturas máxima e mínima do *Performance Grade* (PG) do ligante, subtraídos 3 °C, não ultrapassando 21 °C. No entanto, em razão da limitação da capacidade da célula de carga do equipamento (± 15 kN), optou-se por realizar os ensaios à temperatura

de 25 °C, de modo a reduzir a rigidez das misturas e evitar a ocorrência de deformações plásticas excessivas durante o carregamento cíclico.

Os ensaios foram executados sob controle de deformação, adotando-se três níveis distintos de amplitude, aproximadamente 130 $\mu\epsilon$, 155 $\mu\epsilon$ e 180 $\mu\epsilon$, com o objetivo de provocar a ruptura das amostras em um intervalo de 1.000 a 100.000 ciclos, conforme recomendado para a adequada caracterização do comportamento à fadiga. Para cada nível de deformação, foram ensaiadas três amostras, garantindo a representatividade dos resultados.

O procedimento experimental compreendeu duas etapas principais. Inicialmente, foi aplicada uma carga de baixa magnitude, à mesma frequência do ensaio de fadiga, mantendo-se as deformações entre 50 e 75 $\mu\epsilon$, com o objetivo de determinar o módulo dinâmico inicial nas mesmas condições de temperatura e frequência do ensaio principal. Essa etapa, conhecida como "*fingerprint*", é empregada no modelo S-VECD para corrigir a variabilidade entre amostras de uma mesma mistura, permitindo a obtenção da Razão do Módulo Dinâmico (DMR). Após um intervalo de 20 minutos, destinado à estabilização da amostra, procedeu-se à realização do ensaio de fadiga propriamente dito, no qual o atuador foi programado para impor um deslocamento de pico constante a cada ciclo de carregamento.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no programa experimental, contemplando, inicialmente, a caracterização do ligante asfáltico modificado com borracha, com ênfase nos parâmetros físicos e reológicos que descrevem seu comportamento em diferentes condições de solicitação. Em seguida, são analisados os resultados dos ensaios mecânicos aplicados às misturas asfálticas Faixa B e *gap-graded*, produzidas com o asfalto-borracha denominado AB 10, investigando-se o desempenho frente aos principais mecanismos de deterioração e a influência da granulometria no comportamento mecânico, de modo a comparar como diferentes estruturas granulométricas respondem à utilização do mesmo ligante modificado.

4.1. Ligantes asfálticos

Após a moldagem das amostras do ligante de referência CAP 50/70 e dos ligantes modificados com borracha de pneu LGF-40P (AB 5%, AB 10% e AB 15%), foi realizada a caracterização física e reológica; a Tabela 13 sintetiza os resultados obtidos e as especificações requeridas para o ligante de referência (AV).

Tabela 13: Tabela resumo dos ensaios realizados no ligante referência (AV)

CAP 50/70 (AV)		
Antes RTFO	Resultado	Especificações
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	65,8	50-70
Ponto de amolecimento, °C	48	≥46
Viscosidade Rotacional a 135°C SP 21 20 rpm, cP	458,67	≥274
Viscosidade Rotacional a 150°C SP 21 20 rpm, cP	227,79	≥112
Viscosidade Rotacional a 177°C SP 21 20 rpm, cP	83,09	57-285
Recuperação elástica (25°C, 20 cm), %	-	-
Temperatura mais alta PG, °C	67,2	-
Após RTFO	Resultado	Especificações
Varição de massa, %	0,067	≤ 0,5
Varição do ponto de amolecimento, °C	6,5	≤ 8,0
Penetração retida, %	80,55	≥ 55
Viscosidade Rotacional a 135°C SP 21 20 rpm, cP	715,03	-
Viscosidade Rotacional a 150°C SP 21 20 rpm, cP	334,71	-
Viscosidade Rotacional a 177°C SP 21 20 rpm, cP	115,5	-
Temperatura mais alta do PG pós RTFO, °C	67,3	-
Jnr 3,2 kPa, kPa-1	3,29	Tráfego padrão: 2,0 < S ≤ 4,0
Jnrdiff, %	22,28	≤ 75
R0,1, %	9,81	-
R3,2, %	0,83	-

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos para os ligantes com adição de borracha de pneu, bem como as especificações requeridas para o ligante modificado com borracha de pneu (AB8 e AB22), determinadas pela resolução ANP nº 897/2022 e as orientações fornecidas pela AASHTO M323 (2023) para MSCR.

Tabela 14: Tabela resumo dos ensaios realizados nos ligantes modificados

LIGANTE MODIFICADO					
Antes RTFO	Resultados			Especificações	
	AB 5%	AB 10%	AB 15%	AB8	AB22
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	43	30	25	30-70	
Ponto de amolecimento, °C	55	56	61	55	57
Viscosidade Rotacional a 135°C SP 21 20 rpm, cP	1100,0	1642,3	5150,0		
Viscosidade Rotacional a 150°C SP 21 20 rpm, cP	505,0	744,9	2110,0		
Viscosidade Rotacional a 177°C SP 21 20 rpm, cP	182,0	229,3	762,3		
Recuperação elástica (25°C, 20 cm), %	35	55	68	50	55
Temperatura mais alta PG, °C	74,4	82,7	89,9	-	-
Estabilidade à estocagem, máx, °C	7,00	6,75	1,00	9	9
Após RTFO	Resultados			Especificações	
Varição de massa, %	0.095	0.032	0,055	<1	
Varição do ponto de amolecimento, °C	4	10	12	10	
Penetração retida, %	61	74	82	55	
Viscosidade Rotacional a 135°C SP 21 20 rpm, cP	1761,6	2744,0	7069,0		
Viscosidade Rotacional a 150°C SP 21 20 rpm, cP	752,3	1262,5	3145,0		
Viscosidade Rotacional a 177°C SP 21 20 rpm, cP	241,9	461,3	1319,0		
Porcentagem de recuperação elástica original (25°C, 20cm), %, mín.	184	135	-	>100	
Temperatura mais alta do PG pós RTFO, °C	75,2	87	91,1	-	
Jnr 3,2 kPa, kPa-1	0,795	0,138	0,092	2,0 < S ≤ 4,0	
Jnrdiff, %	35,13%	92,83	155,77	<75	
R0,1, %	32,59	74,19	83,34	-	
R3,2, %	15,65	52,79	59,72	-	

*Nível de Tráfego – S: tráfego padrão

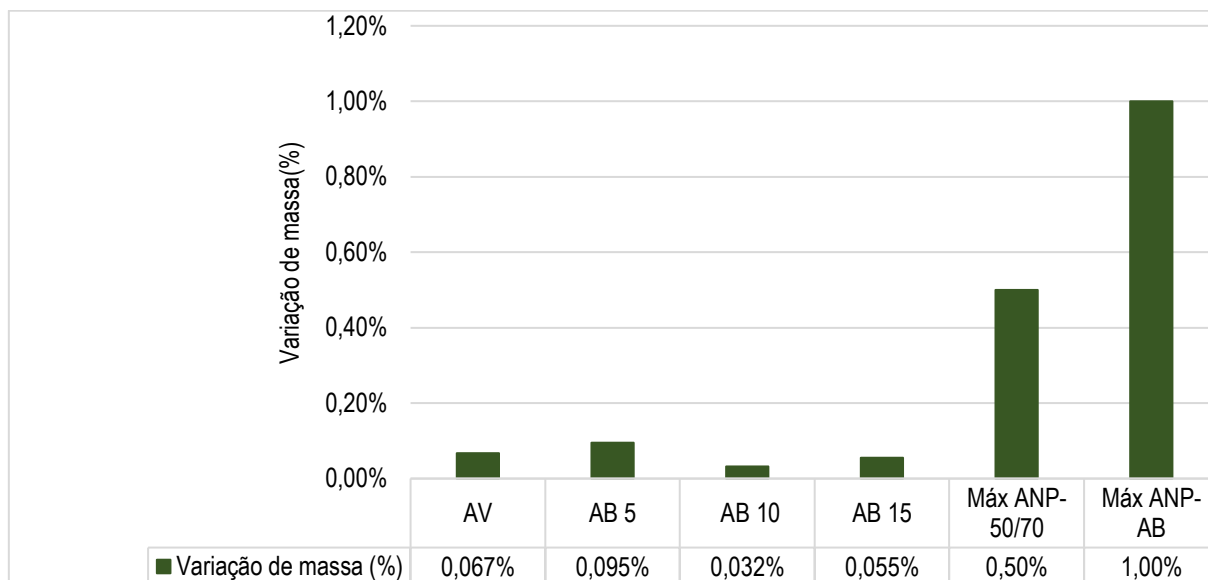
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

4.1.1. Caracterização física

A Figura 40 apresenta os resultados obtidos para as variações na perda de massa do ligante puro e do ligante modificado com a borracha de pneu, após ensaio de envelhecimento a curto prazo (RTFO). O Teste de Forno de Filme Fino Rotativo (RTFO) é um dos métodos experimentais mais

comumente utilizados para simular o processo oxidativo de curto prazo do ligante durante a mistura na usina e o transporte até a compactação do pavimento (Jin *et al.*, 2024). Além disso, a condição envelhecida pelo RTFO é um pré-requisito para a realização de ensaios posteriores, pois a perda de massa do ligante implica diretamente o comportamento reológico do material.

Figura 40: Gráfico de variação de massa do ensaio de RTFO



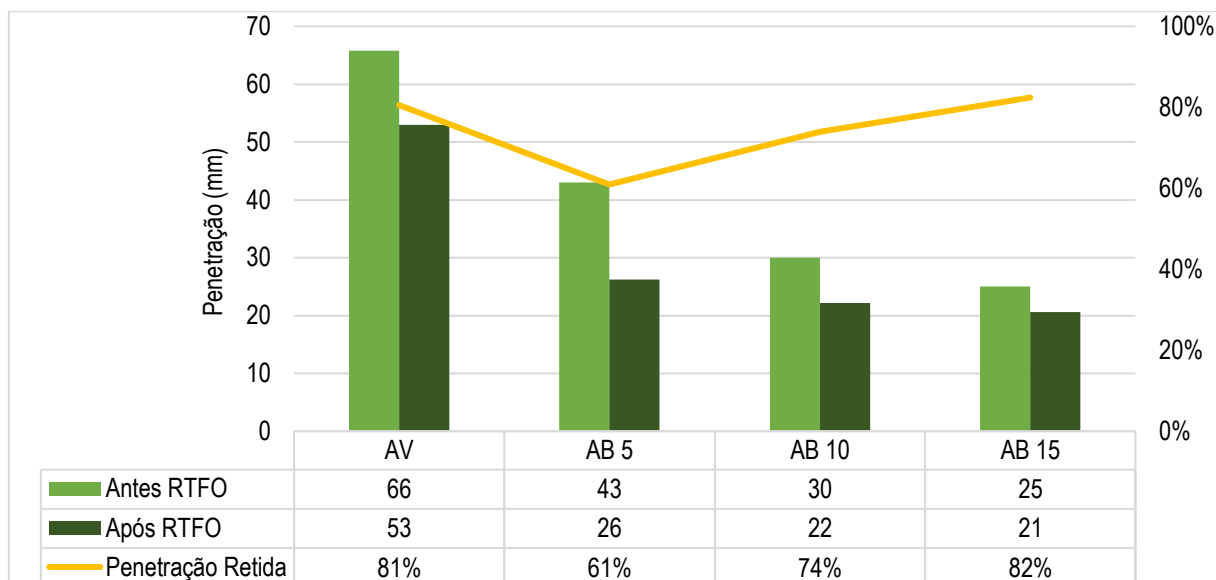
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

No gráfico, verifica-se que as variações de massa após o envelhecimento foram baixas para todos os ligantes avaliados. O ligante asfáltico puro (AV) apresentou variação de 0,067%, enquanto os ligantes asfalto-borracha registraram 0,095% (AB 5%), 0,032% (AB 10%) e 0,055% (AB 15%). Nota-se que o AB 10% apresentou o menor valor, sugerindo maior estabilidade térmica, menor volatilização nas condições do ensaio, ao passo que AB 5% e AB 15% mantiveram variações ligeiramente superiores, porém ainda reduzidas. Em termos normativos, todos os resultados estão abaixo dos limites da resolução ANP nº 897/2022, de 0,5% para o CAP 50/70 e de 1,0% para o ligante modificado com borracha, indicando conformidade e boa estabilidade quanto à variação de massa.

A Figura 41 apresenta os resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO. Observa-se que o ligante base (AV) reduziu a penetração de 66 para 53 (0,1 mm), mantendo 81% da penetração inicial, o que confirma o endurecimento típico após o envelhecimento de curto prazo. Para os ligantes modificados com borracha, os valores de penetração antes do RTFO já foram menores e diminuíram ainda mais após o envelhecimento: AB 5% passou de 43 para 26 (0,1 mm) (61% de penetração retida), AB 10% de 30 para 22 (0,1 mm) (74% retida) e AB 15% de 25 para 21 (0,1 mm) (82% retida). Esses resultados indicam que a incorporação de borracha reduz a penetração (maior rigidez do ligante) e que o RTFO promove endurecimento adicional; entretanto, a sensibilidade ao envelhecimento (avaliada pela

penetração retida) varia com o teor de borracha, com maior queda relativa no AB 5% e melhor retenção no AB 15%, próxima à do ligante base. A redução de penetração com o aumento do teor de borracha pode ser associada ao efeito físico da fase borracha no ligante, que aumenta a resistência à penetração da agulha e eleva a consistência (Alsheyab *et al.*, 2025), o que tende a favorecer o desempenho frente à deformação permanente.

Figura 41: Gráfico do ensaio de penetração



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

O resultado obtido para o ligante asfáltico virgem (AV) está em conformidade com os critérios da Resolução ANP nº 897/2022, que estabelece um intervalo de penetração entre 50 e 70 décimos de milímetro. No entanto, os ligantes modificados com borracha de pneu apresentaram valores de penetração inferiores ao intervalo especificado para esse tipo de cimento asfáltico, evidenciando o efeito endurecedor da adição de borracha, também em conformidade com a tendência de valores encontrados por Al-Rubaie e Hasan (2021). Ainda assim, considerando os limites definidos pela mesma norma para o asfalto-borracha, cuja penetração deve situar-se entre 30 e 70 décimos de milímetro, observa-se que os ligantes modificados com 5% e 10% de borracha se enquadram nessa faixa, atendendo às especificações exigidas para esse tipo de material.

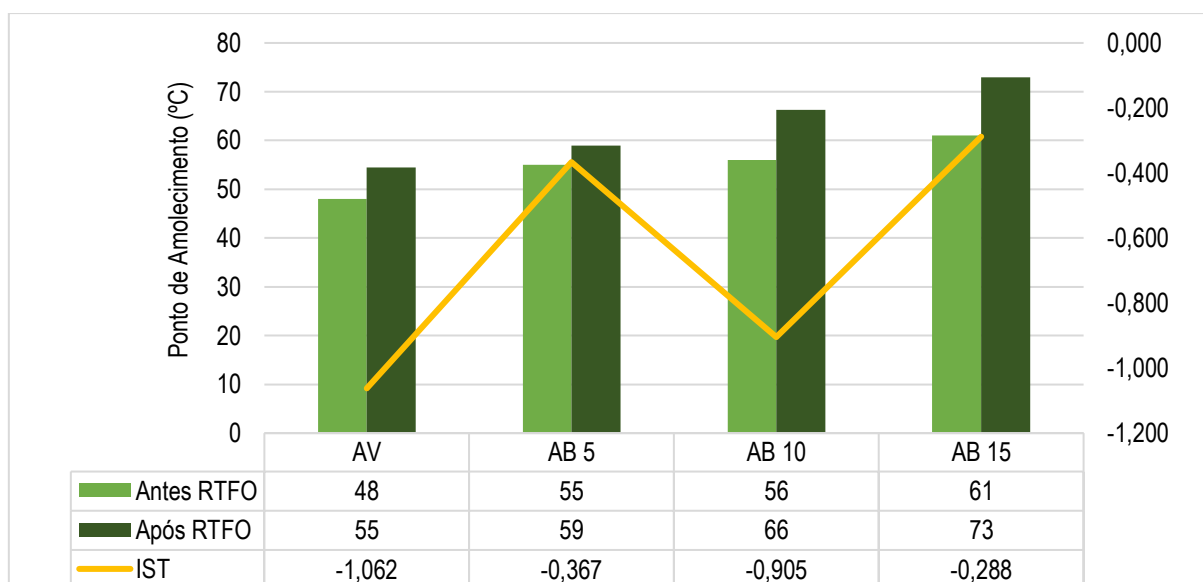
A penetração retida expressa a capacidade do ligante de preservar sua consistência após o envelhecimento térmico (RTFO). Com base nos resultados da Figura 41, verificam-se valores de penetração retida de 81% para o ligante virgem (AV), 61% para AB 5%, 74% para AB 10% e 82% para AB 15%. Assim, todos os ligantes atenderam ao limite mínimo de 55% estabelecido pela Resolução ANP nº 897/2022, indicando adequada resistência ao envelhecimento de curto prazo nas condições do ensaio.

Além disso, observa-se que os ligantes asfalto-borracha apresentaram menores valores absolutos de penetração tanto antes quanto após o RTFO, em comparação ao ligante puro, o que evidencia maior rigidez dos ligantes modificados. Isso é coerente com o efeito da adição de borracha: a incorporação de partículas sólidas na matriz asfáltica aumenta a resistência à penetração e, portanto, eleva a rigidez do ligante. Como consequência, os ligantes modificados tendem a apresentar maior consistência do que o ligante puro. Em conjunto, os resultados sugerem que a borracha contribui para um ligante mais rígido e com retenção satisfatória de propriedades após envelhecimento, o que pode ser favorável ao desempenho frente à deformação permanente.

Os resultados do ensaio de ponto de amolecimento são apresentados na Figura 42. Observa-se que todos os ligantes apresentaram aumento após o envelhecimento a curto prazo (RTFO), evidenciando o endurecimento associado à volatilização de frações leves e à oxidação. O ligante virgem (AV) elevou o ponto de amolecimento de 48°C para 55°C. Para os ligantes modificados, também houve incremento: AB 5% passou de 55°C para 59°C, AB 10% de 56°C para 66°C e AB 15% de 61°C para 73°C, sendo este último o maior valor após RTFO.

Além disso, nota-se que, mesmo antes do RTFO, os ligantes com borracha já apresentam pontos de amolecimento superiores ao ligante base, e que o aumento tende a ser mais pronunciado com o maior teor de borracha, indicando maior consistência e estabilidade térmica. Em termos de desempenho, esses resultados sugerem que a modificação com borracha amplia a resistência do ligante ao amolecimento em temperaturas elevadas, condição associada a melhor resposta frente à deformação permanente (Al-Rubaie; Hasan, 2021).

Figura 42: Resultado do ensaio de ponto de amolecimento



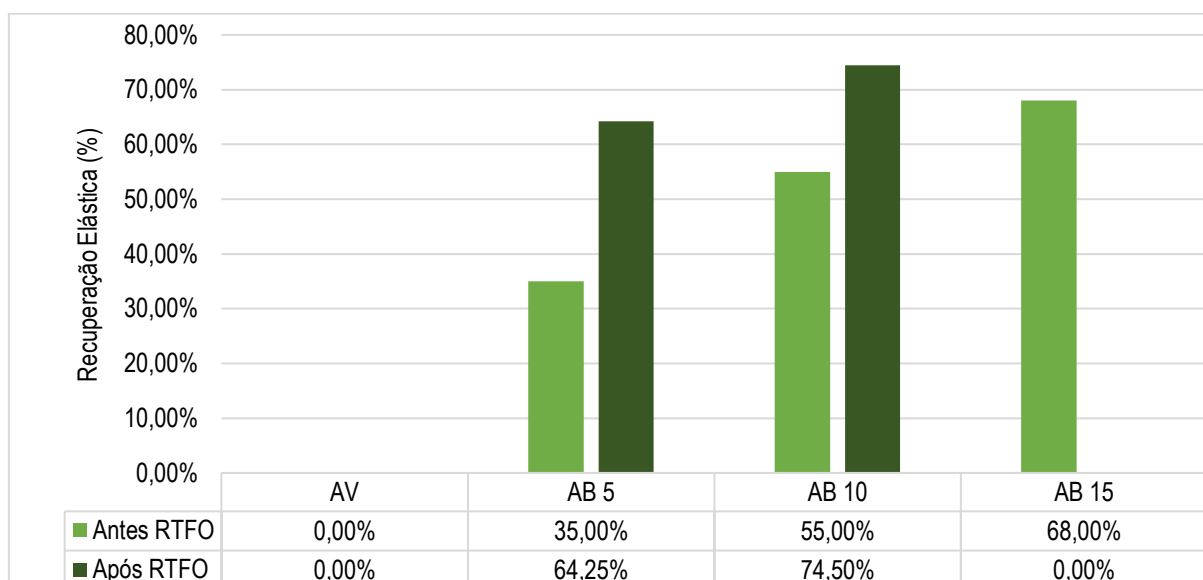
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Esse comportamento também se reflete no Índice de Susceptibilidade Térmica (IST), calculado a partir dos resultados de penetração e ponto de amolecimento. Observa-se que todos os ligantes apresentaram IST negativo (AV = -1,062; AB 5% = -0,367; AB 10% = -0,905; AB 15% = -0,288), indicando menor suscetibilidade térmica, característica desejável para ligantes e misturas asfálticas em serviço. Além disso, todos os valores encontram-se dentro da faixa de especificação indicada pela ANP para o CAP 50/70 (-1,5 a +0,7), confirmando conformidade quanto à sensibilidade à temperatura.

Para o resultado de Recuperação elástica (Figura 43), observa-se que a recuperação elástica foi nula para o ligante puro (AV), tanto antes quanto após o RTFO (0,0%), confirmando o caráter predominantemente viscoso do CAP 50/70. Em contraste, a incorporação de borracha conferiu resposta claramente mais elástica aos ligantes modificados: antes do RTFO, a recuperação aumentou com o teor de borracha, passando de 35,0% (AB 5%) para 55,0% (AB 10%) e 68,0% (AB 15%), evidenciando a contribuição dos componentes elastoméricos da borracha na capacidade de deformar e retornar após a descarga (Mensch *et al.*, 2022).

Após o envelhecimento de curto prazo (RTFO), os ligantes AB 5% e AB 10% não apenas mantiveram, mas apresentaram incremento na recuperação elástica, atingindo 64,25% e 74,50%, respectivamente, o que sugere que a modificação permaneceu efetiva e que o endurecimento/oxidação do ligante base não eliminou o caráter elástico associado à fase borracha. Por outro lado, o ligante AB 15% apresentou comportamento discrepante: apesar da elevada recuperação antes do RTFO (68,0%), a recuperação caiu para 0,0% após o envelhecimento.

Esse resultado não é compatível com uma simples hipótese de degradação térmica da borracha, pois, se a degradação fosse o mecanismo dominante nas condições do RTFO, seria esperado algum efeito também nos teores menores (AB 5% e AB 10%), o que não ocorreu. Assim, uma interpretação mais coerente é a ocorrência de saturação por excesso de borracha, levando a uma microestrutura menos coesa, sendo assim o teor elevado pode ter ultrapassado a capacidade de dispersão do ligante, favorecendo aglomeração de partículas, aumento excessivo de viscosidade e perda de continuidade da matriz asfáltica. Como consequência, após o RTFO, o material pode ter perdido coesão e deixado de apresentar resposta resiliente mensurável, resultando em recuperação elástica nula.

Figura 43: Resultado do ensaio de recuperação elástica

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

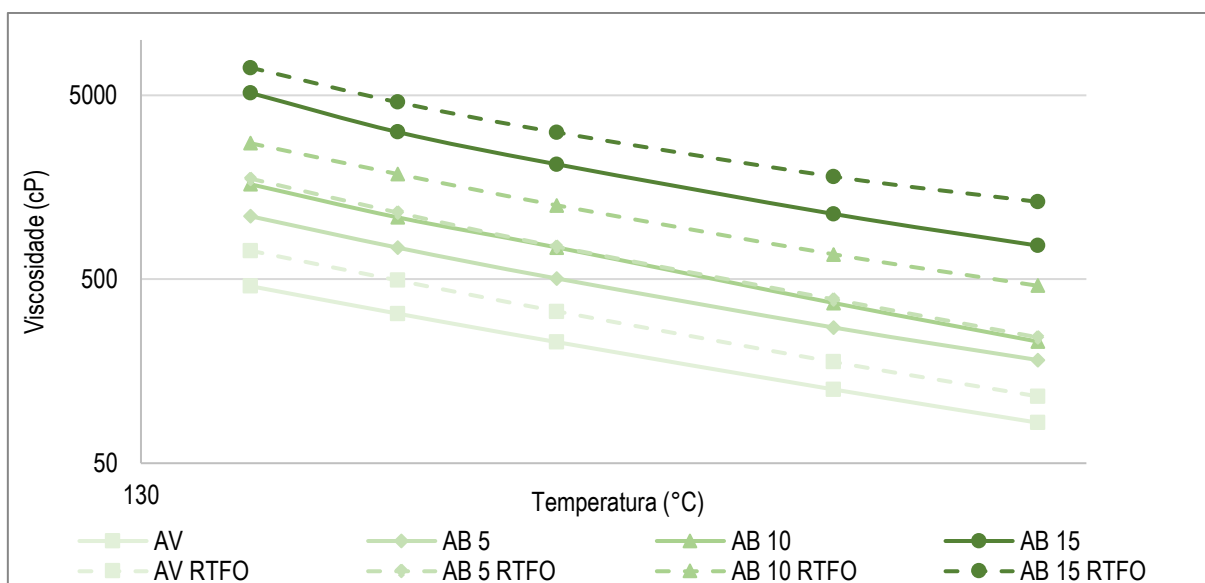
O gráfico da Figura 44 apresenta os resultados do ensaio de viscosidade rotacional dos ligantes antes e após o envelhecimento de curto prazo (RTFO). Observa-se a tendência esperada de redução da viscosidade com o aumento da temperatura para todas as amostras, bem como um aumento de viscosidade após o RTFO, compatível com o endurecimento por oxidação e perda de frações leves. Além disso, os ligantes modificados com borracha mantêm viscosidades superiores ao ligante base (AV) em toda a faixa de temperatura analisada, o que está em consonância com os resultados de menor penetração e maior ponto de amolecimento previamente discutidos.

Entre os compósitos, o AB 15% apresenta os maiores níveis de viscosidade (antes e após RTFO), evidenciando um ligante significativamente mais rígido. Do ponto de vista de deformação permanente, essa elevação de rigidez tende a ser benéfica, pois aumenta a resistência ao escoamento em temperaturas elevadas. Contudo, considerando o conjunto de resultados já obtidos, percebe-se que o material está bem rígido, e essa condição pode representar uma relação de compensação importante: ligantes excessivamente rígidos podem se tornar mais suscetíveis a trincamento por fadiga precoce (e/ou trincamento térmico), uma vez que o ganho em resistência a deformação permanente não necessariamente se traduz em desempenho equilibrado frente aos diferentes mecanismos de dano. Portanto, embora o aumento de viscosidade seja desejável para controlar a deformação permanente, é essencial verificar, em conjunto com os parâmetros de desempenho (especialmente condições de rigidez e ensaios de fadiga), se o nível de rigidez alcançado não compromete a resistência ao trincamento.

Por fim, o incremento de viscosidade também implica consequências práticas: ligantes mais viscosos exigem maiores temperaturas de usinagem e compactação para garantir trabalhabilidade e

adequada envoltória dos agregados, o que pode impactar consumo energético, emissões e controle de campo.

Figura 44: Resultado de recuperação elástica antes e após o envelhecimento a curto prazo (RTFO)

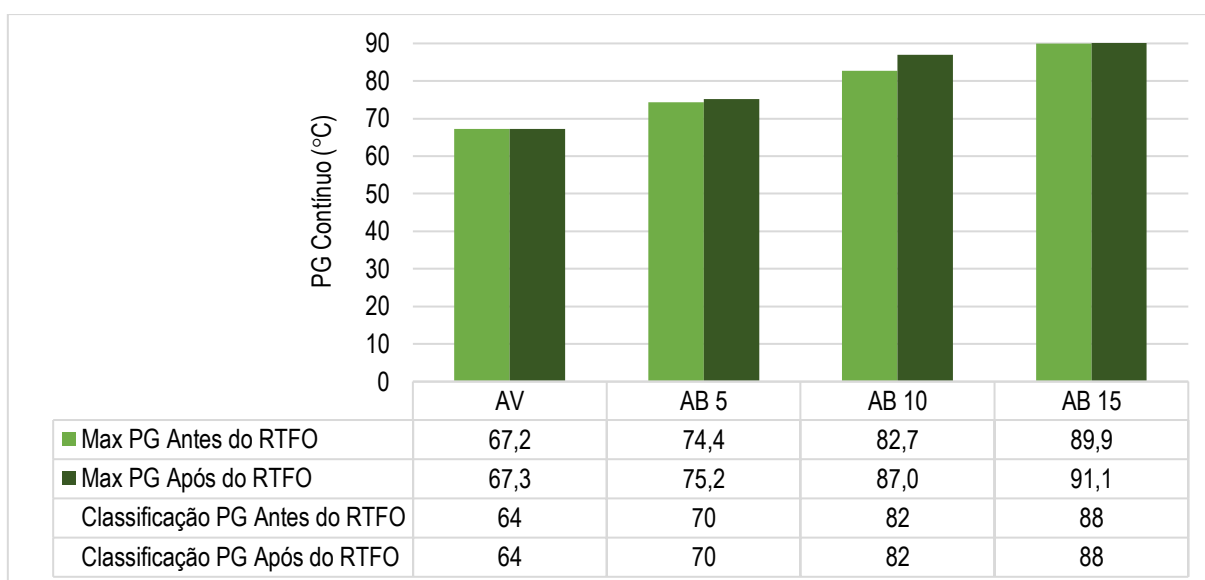


Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

4.1.2. Caracterização reológica

A Figura 45 apresenta os resultados da determinação do Performance Grade (PG) dos ligantes antes e após o envelhecimento, bem como sua classificação segundo o sistema SUPERPAVE, conforme os critérios estabelecidos na AASHTO M 320-22.

Figura 45: Resultado do ensaio de *performance grade* (PG)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Os resultados de *Performance Grade* (PG) indicam que a incorporação de borracha eleva a temperatura crítica de alto desempenho do ligante, deslocando-o para faixas superiores de classificação SUPERPAVE. O ligante de referência (AV) apresentou PG contínuo praticamente inalterado com o RTFO, mantendo a classificação PG 64. Para os ligantes modificados, observam-se aumentos no PG contínuo em relação ao AV: AB 5% (classificação PG 70), AB 10% (classificação PG 82) e AB 15% (classificação PG 88).

Embora exista uma tendência geral de aumento após o RTFO, nota-se que apenas o teor de 10% apresentou incremento mais expressivo no PG contínuo (+4,3 °C), enquanto os demais tiveram variações discretas (AV +0,1 °C, AB 5% +0,8 °C, AB 15% +1,2 °C). Ainda assim, é importante destacar que, pela metodologia SUPERPAVE, a classificação final não se alterou com o envelhecimento (permaneceu PG 64, 70, 82 e 88, respectivamente), indicando que o RTFO, nas condições do ensaio, não foi suficiente para promover “salto” de classe, apesar do endurecimento evidenciado no PG contínuo.

Em termos comparativos, Malta (2023) reportou para um ligante comercial modificado com SBS (AMP 65/90), valor da mesma ordem do AB 5%. Já o AB 10% após RTFO aproxima-se do patamar observado para ligantes altamente modificados (HiMA) com SBS, enquanto o AB 15% atingiu valores ainda mais elevados. Esses resultados reforçam que a borracha, mesmo sem polímeros sintéticos como SBS, pode elevar o desempenho reológico em altas temperaturas a níveis comparáveis aos de ligantes modificados comercialmente, com destaque para o teor de 10%, que foi o que apresentou o ganho pós-RTFO mais expressivo.

A partir dos resultados do ensaio *Performance Grade* (PG), foram construídas as curvas do parâmetro $|G|/\text{sen } \delta^*$ em função da temperatura (46 a 88 °C) para as amostras antes e após o envelhecimento de curto prazo (RTFO), conforme apresentado nas Figuras 46 e 47. Adotou-se como referência o critério da AASHTO M 320, que estabelece valores mínimos de 1,0 kPa para ligantes não envelhecidos e 2,0 kPa após RTFO, como requisito de resistência ao acúmulo de deformação permanente em altas temperaturas.

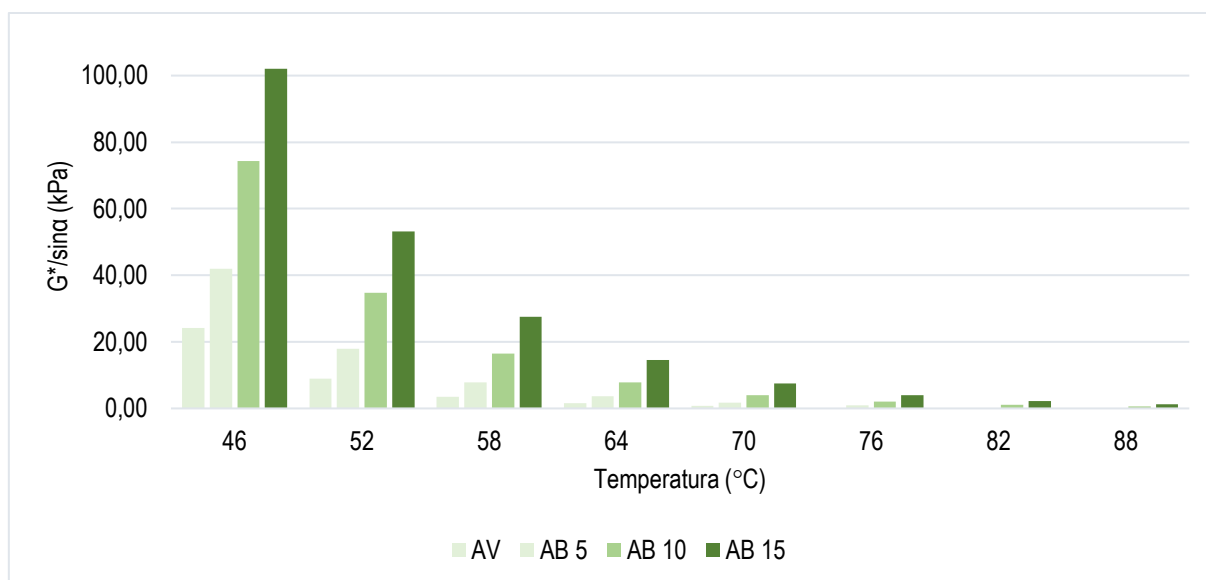
De modo geral, observa-se que o aumento do teor de borracha promove elevação sistemática de $|G^*|/\text{sen } \delta$ em praticamente toda a faixa térmica analisada, evidenciando incremento da rigidez efetiva e maior capacidade do ligante em resistir ao escoamento viscoplástico. Esse comportamento é mais pronunciado nas temperaturas mais baixas do conjunto (46–64 °C), nas quais se verifica maior separação entre as formulações, com o AB 15% apresentando os maiores valores, seguido de AB 10%, AB 5% e AV. À medida que a temperatura aumenta (≥ 70 °C), os valores do parâmetro reduzem acentuadamente para todos os ligantes, aproximando-se do limiar normativo, o que reforça o caráter

termossensível do material e a importância da modificação para ampliar a faixa de desempenho em altas temperaturas.

Após o RTFO, observa-se um deslocamento das curvas para valores superiores de $|G^*|/\sin \delta$ em relação às condições não envelhecidas, indicando endurecimento associado ao envelhecimento termo oxidativo. Ainda assim, a hierarquia entre os ligantes se mantém, e o efeito da borracha torna-se mais evidente, coerente com o aumento de consistência verificado nos ensaios. Resultados dessa natureza são compatíveis com o relatado por Jin *et al.* (2024), que associam o ganho de desempenho em altas temperaturas ao intumescimento das partículas de borracha e ao fortalecimento das interações físico-químicas com a matriz asfáltica, elevando a contribuição elástica e a resistência a deformação permanente.

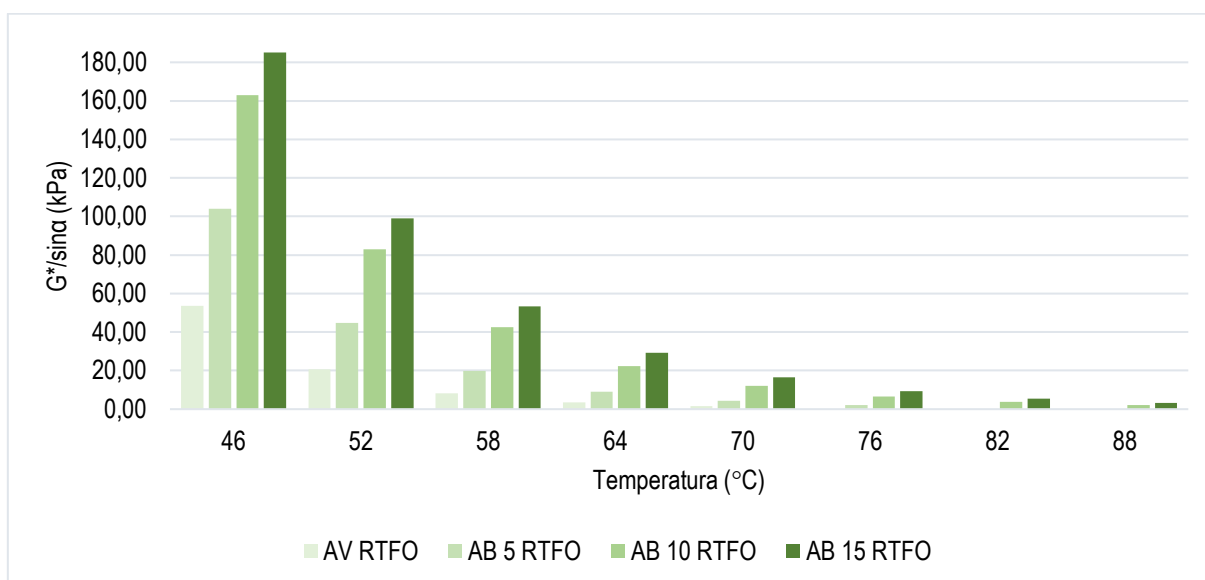
Por fim, embora o aumento de $|G^*|/\sin \delta$ seja favorável do ponto de vista de deformação permanente, a interpretação desses resultados deve ser integrada aos indicadores de desempenho em temperaturas intermediárias e baixas, a fim de evitar um ligante excessivamente rígido e potencialmente mais suscetível ao trincamento por fadiga, assegurando um desempenho balanceado do material.

Figura 46: Resultado do $|G^*|/\sin \delta$ com a variação de temperatura antes do RTFO



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

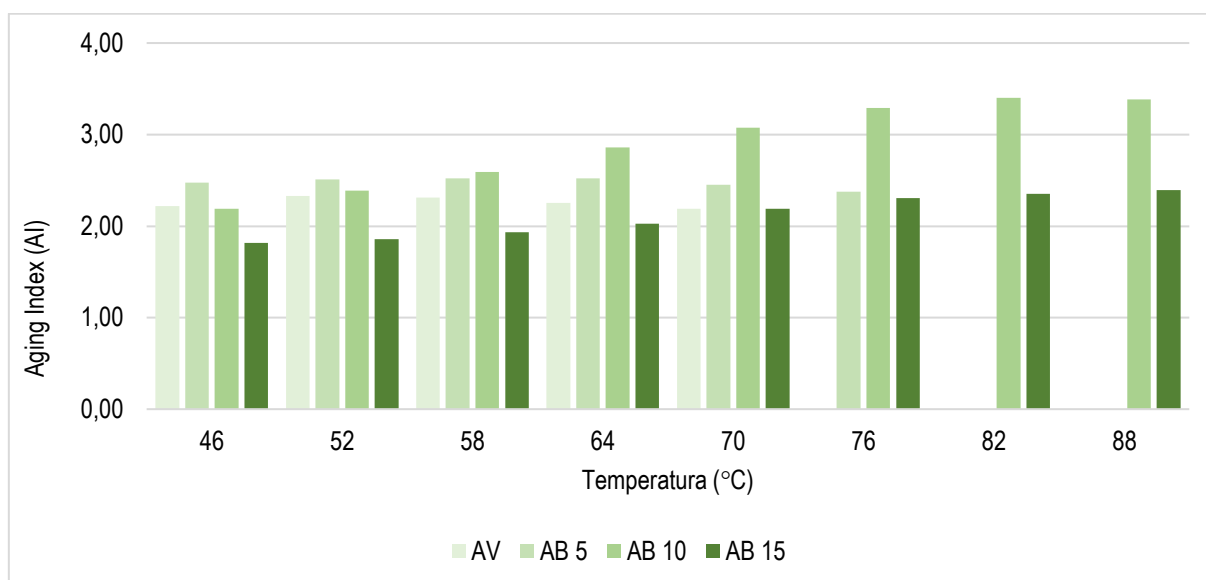
Figura 47: Resultado do $|G^*|/\text{sen } \delta$ com a variação de temperatura após o RTFO



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Ma *et al.* (2025) analisaram a modificação do ligante asfáltico utilizando três tipos de borracha de pneu: borracha reciclada sem qualquer tratamento (com sua rede reticulada original preservada), borracha com baixo grau de reticulação e borracha com alto grau de reticulação, aplicadas nos teores de 15%, 20% e 25%. Os autores observaram que o fator de deformação permanente $|G^*|/\text{sen } \delta$ aumentou de forma monotônica com o acréscimo do teor de borracha quando utilizado o pó de borracha não tratado, resultado atribuído à manutenção da sua rede tridimensional reticulada, que confere maior elasticidade e resistência ao fluxo viscoso. Em contraste, as borrachas submetidas a tratamentos de *descrosslinking*, que reduzem a densidade de ligações cruzadas, apresentaram menores valores desse parâmetro, evidenciando a perda parcial do caráter elástico e, conseqüentemente, menor resistência à deformação permanente. Como no presente trabalho foi utilizado pó de borracha de pneu sem qualquer tipo de tratamento, os resultados obtidos mostram forte concordância com as observações dos autores.

A Figura 48 apresenta os resultados do *Aging Index* (AI), determinado como a razão entre o $|G^*|/\text{sen } \delta$ após o RTFO e antes do RTFO, para cada temperatura avaliada. Em termos interpretativos, valores de AI mais elevados indicam maior sensibilidade ao envelhecimento de curto prazo, isto é, maior aumento relativo de rigidez decorrente do RTFO; por outro lado, valores menores sugerem maior estabilidade frente ao envelhecimento termo oxidativo.

Figura 48: Resultado do *Aging Index* (AI)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

De modo geral, observa-se que o AI tende a aumentar com a temperatura, especialmente para o AB 10%, que apresenta crescimento mais acentuado nas temperaturas mais elevadas, indicando que essa formulação foi a que apresentou maior incremento relativo do $|G^*|/\text{sen } \delta$ após o envelhecimento nessa faixa térmica. O ligante AB 5% também apresenta aumento do AI com a temperatura, porém em patamar intermediário. Já o ligante de referência AV mantém valores de AI relativamente estáveis e moderados ao longo da faixa analisada, sugerindo resposta ao RTFO menos dependente da temperatura quando comparado ao AB 10%.

Por sua vez, o ligante com maior teor de borracha (AB 15%) apresenta, de forma consistente, os menores valores de AI em todas as temperaturas, evidenciando menor suscetibilidade ao envelhecimento. Esse comportamento pode ser associado ao efeito da borracha na matriz asfáltica, que tende a aumentar a fração elastomérica e a reduzir a variação relativa das propriedades reológicas após o RTFO, resultando em maior resistência do ligante frente ao envelhecimento de curto prazo.

Em síntese, os resultados de AI indicam que, embora a borracha eleve a rigidez absoluta dos ligantes, a sensibilidade ao envelhecimento não cresce necessariamente de forma monotônica com o teor de borracha, sendo fortemente influenciada pela formulação e pela temperatura. Dessa forma, a análise do Aging Index complementa a avaliação do PG e de $|G^*|/\text{sen } \delta$, permitindo identificar ligantes que combinam ganho de desempenho em altas temperaturas com maior estabilidade ao envelhecimento.

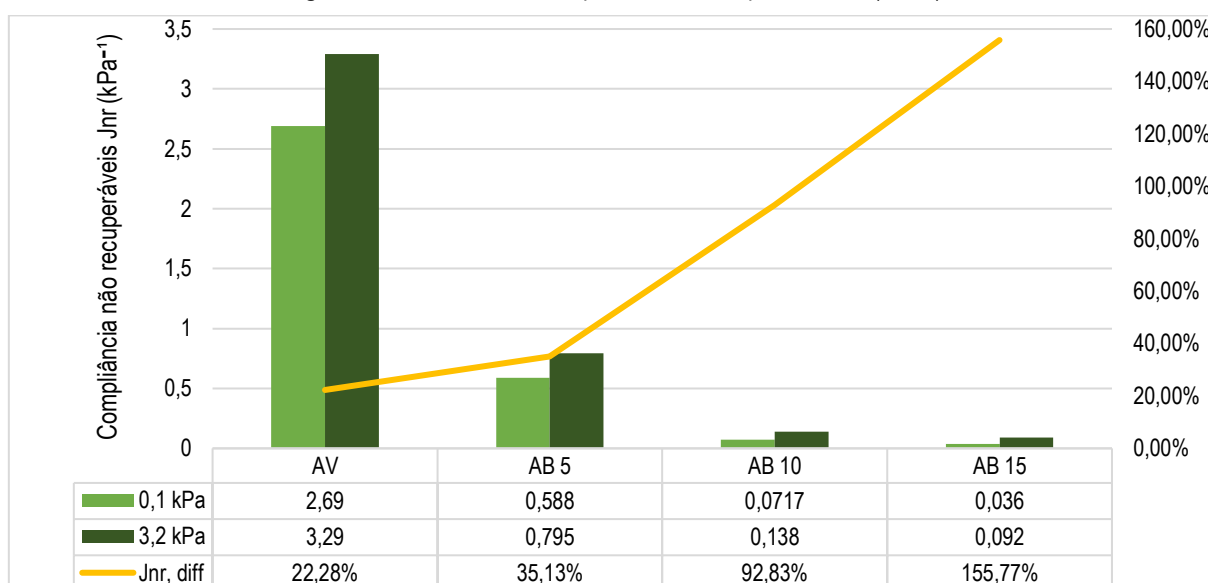
A partir do ensaio MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery), foram determinados os valores de compliância não recuperável (Jnr) nos níveis de tensão de 0,1 kPa e 3,2 kPa, conforme apresentado na Figura 49. Ressalta-se que os ensaios foram conduzidos a 64 °C (temperatura correspondente ao PG

64 do ligante base AV) de modo a padronizar a comparação entre as formulações e avaliar diretamente o efeito da borracha em relação ao ligante de referência.

Nessas condições, o AV apresentou os maiores valores de Jnr (2,69 a 0,1 kPa e 3,29 a 3,2 kPa), indicando maior suscetibilidade à deformação permanente. Com a incorporação de borracha, observa-se redução expressiva de Jnr, evidenciando elevada resistência ao acúmulo de deformação a medida que á adição de borracha. Em síntese, os resultados a 64 °C confirmam que a borracha melhora substancialmente a resistência deformação permanente em relação ao ligante base, em linha com tendências reportadas na literatura (Jin *et al.*, 2024; Ma *et al.*, 2025).

A análise da sensibilidade à tensão (Jnr,diff) indica que, apesar da expressiva redução de Jnr com o aumento do teor de borracha, há um aumento acentuado da dependência do ligante em relação ao nível de carregamento. Esse comportamento evidencia que, embora a borracha aumente a resistência às deformações permanentes (redução do Jnr), ela também torna o ligante mais não linear e sensível à variação de tensão, possivelmente em razão da maior concentração de partículas de borracha, que intensifica interações físicas e restringe a mobilidade da matriz asfáltica. Assim, os resultados sugerem que teores elevados de borracha intensificam o comportamento dependente da carga, aspecto que deve ser considerado tanto no enquadramento PG quanto em aplicações práticas nas quais há variações significativas de tensões de tráfego.

Figura 49: Resultado das compliância não recuperáveis Jnr (kPa⁻¹)

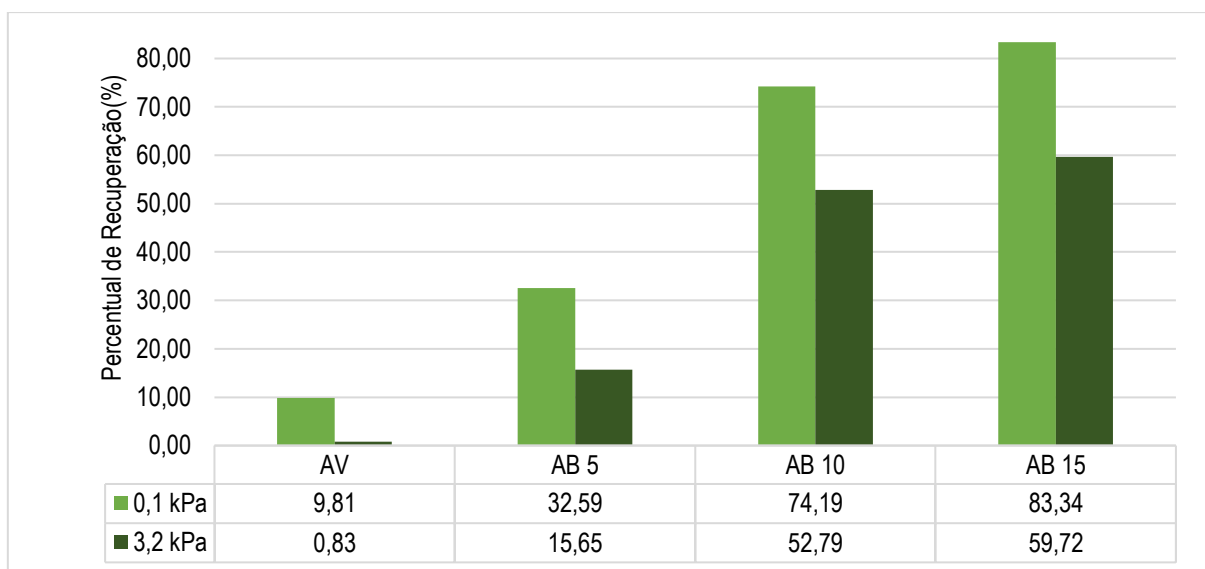


Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

O ensaio de MSCR ainda permite discutir, de forma direta, a parcela recuperável da deformação após cada pulso de carregamento, por meio da recuperação elástica (R%), parâmetro concebido para evidenciar resposta elástica e dependência de tensão em ligantes modificados e não modificados (ASTM,

2024). Nesse contexto, a Figura 50 apresenta o gráfico do ensaio, que mostra uma tendência clara de incremento de R% à medida que aumenta o nível de modificação do ligante, o que é coerente com a interpretação de que ligantes modificados tendem a desenvolver maior elasticidade retardada e, portanto, maior capacidade de “retorno” após o descarregamento (FHWA, 2011; Shirodkar *et al.*, 2012).

Figura 50: Resultado de recuperação elástica (R%) no ensaio MSCR a 0,1 e 3,2 kPa



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Em 0,1 kPa, o ligante AV apresentou recuperação limitada (9,81%), enquanto os ligantes modificados atingiram valores substancialmente superiores (AB5 = 32,59%, AB10 = 74,19%, AB15 = 83,34%). Esse salto, sobretudo a partir do nível AB10, é típico de ligantes com estrutura modificada capaz de armazenar e devolver parte mais significativa da deformação durante o período de recuperação, como discutido em estudos que interpretam a curva de fluência–recuperação do MSCR como combinação de componentes viscoelásticos lineares, não lineares e parcela associada ao efeito de modificação (Shirodkar *et al.*, 2012). Resultados semelhantes também são observados para ligantes SBS, nos quais a elevação da recuperação em tensões padronizadas é atribuída ao reforço da resposta elástica conferida pela modificação (Huang; Tang, 2015).

Ao elevar a tensão para 3,2 kPa, ocorre redução de R% em todos os materiais, evidenciando não linearidade e sensibilidade ao nível de tensão, como previsto na própria concepção do método (ASTM, 2024). O efeito é mais pronunciado no AV, cuja recuperação se torna praticamente nula (0,83%), indicando predominância de deformação não recuperável quando o ligante é submetido a tensões mais altas. Nos ligantes modificados, embora haja queda, a recuperação permanece elevada (AB5 = 15,65%, AB10 = 52,79%, AB15 = 59,72%), sugerindo maior estabilidade reológica e maior capacidade de recuperação mesmo sob condição mais crítica. Essa manutenção de recuperação em 3,2 kPa é

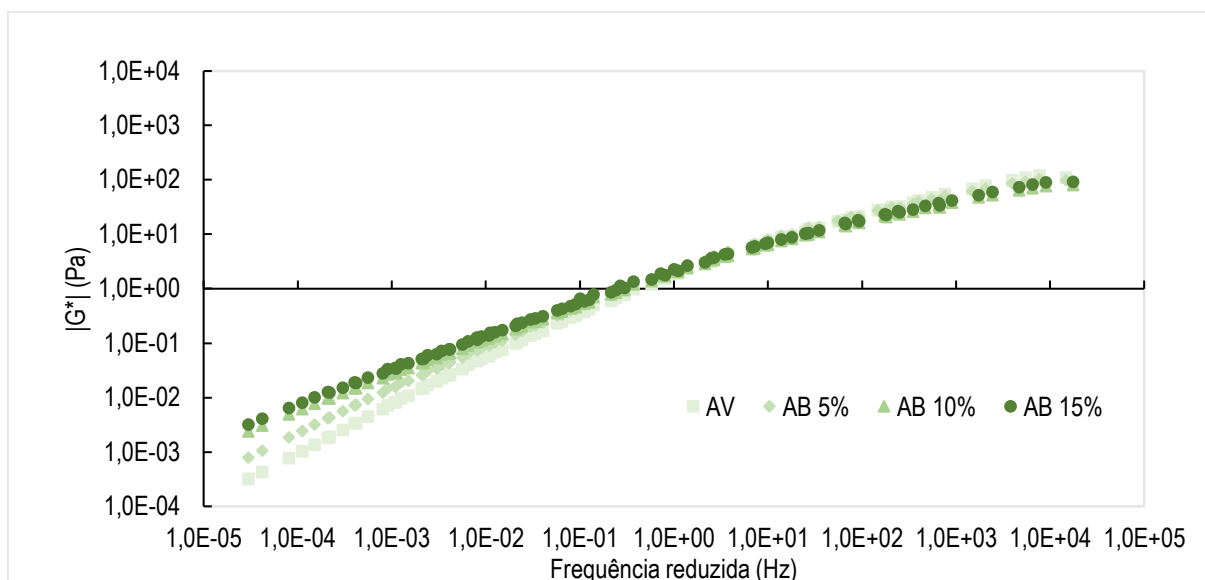
consistente com discussões na literatura de que a resposta em tensões mais elevadas é particularmente útil para diferenciar ligantes modificados daqueles com comportamento predominantemente viscoso (FHWA, 2011; Gaspar *et al.*, 2019).

Do ponto de vista de desempenho, os resultados permitem ordenar a resposta elástica relativa como $AB15 > AB10 > AB5 > AV$, com destaque para AB10 e AB15 por combinarem recuperação muito alta em 0,1 kPa e retenção de recuperação em 3,2 kPa, sinalizando menor propensão ao acúmulo irreversível de deformação durante solicitações repetidas em altas temperaturas (FHWA, 2011; Shirodkar *et al.*, 2012). Ainda que a resistência à deformação no âmbito do MSCR seja discutida de forma mais completa com o Jnr (especialmente em 3,2 kPa), os valores de R% apresentados aqui corroboram, de maneira consistente, o efeito benéfico da modificação na capacidade de recuperação do ligante, especialmente sob tensões mais representativas de condições severas de carregamento

A Figura 51 apresenta as curvas mestras do módulo complexo $|G^*|$ para o ligante de referência (AV) e para os ligantes modificados com borracha, construídas para temperatura de referência de 25 °C. Observa-se que a modificação com borracha altera de forma consistente o comportamento viscoelástico ao longo de uma ampla faixa de frequências reduzidas, evidenciando diferenças de rigidez principalmente nas regiões de baixa frequência reduzida.

De modo geral, o AV tende a apresentar os menores valores de $|G^*|$, sobretudo na região de baixas frequências, associada a maiores tempos de carregamento e condições mais críticas para o desenvolvimento de deformação permanente. Em contraste, os ligantes modificados exibem $|G^*|$ superiores, com tendência de incremento conforme o teor de borracha, indicando enrijecimento da matriz e maior contribuição elástica do compósito. Nota-se, entretanto, que as curvas se aproximam nas altas frequências, sugerindo que o efeito da borracha se torna menos pronunciado nesse domínio, enquanto se intensifica nas baixas frequências, onde a resistência ao fluxo viscoplástico é mais determinante.

Esses resultados reforçam que a incorporação de borracha melhora a rigidez do ligante em condições associadas a altas temperaturas e longos tempos de solicitação, contribuindo para maior resistência ao acúmulo de deformações permanentes, em concordância com as tendências observadas nos ensaios de PG, MSCR e viscosidade rotacional. Comportamentos análogos de aumento de rigidez e deslocamento das curvas mestras também têm sido reportados para ligantes modificados por aditivos e partículas, como observado por Marinho Filho (2023) e Silva (2025), e para ligantes asfalto-borracha em estudos de referência, como Duarte e Faixa (2022).

Figura 51: Resultados das curvas mestras do módulo complexo $|G^*|$ dos ligantes analisados

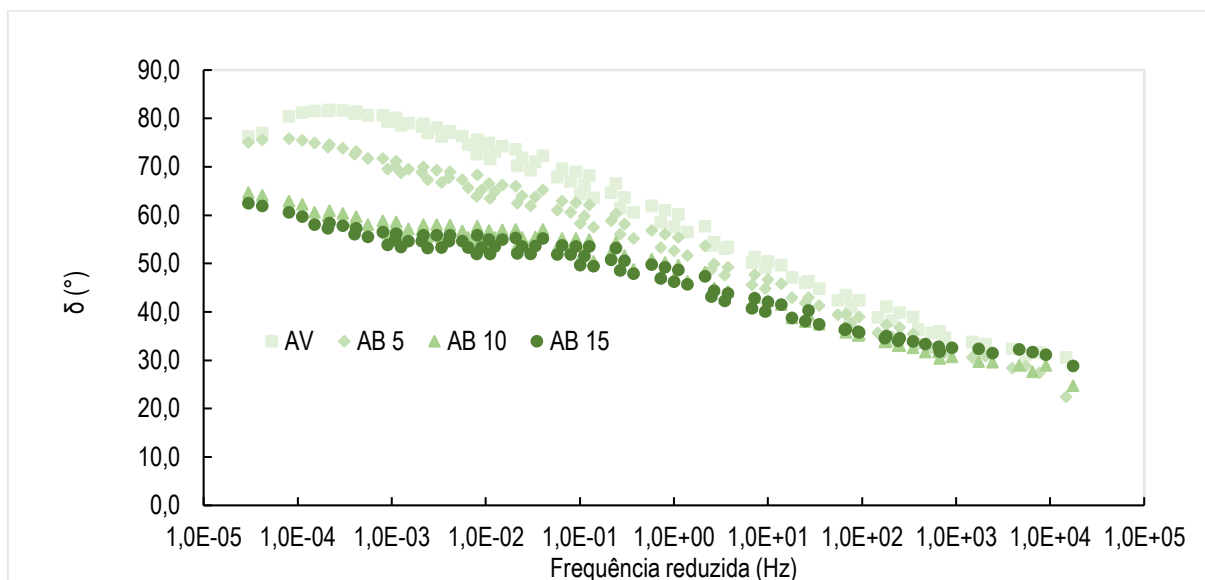
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A Figura 52 apresenta a curva mestra do ângulo de fase (δ) para o ligante de referência (AV/CAP 50/70) e para os ligantes modificados com borracha, construída para temperatura de referência de 25 °C, em função da frequência reduzida. Observa-se, de forma geral, a redução de δ com o aumento da frequência, indicando que, em carregamentos mais rápidos (altas frequências), o comportamento do ligante torna-se relativamente mais elástico, enquanto em baixas frequências (maiores tempos de carregamento) há maior contribuição viscosa.

Comparativamente, o ligante AV apresenta os maiores valores de δ na região de baixas e médias frequências, evidenciando maior predominância viscosa e, portanto, maior propensão ao escoamento sob solicitações prolongadas. Com a incorporação de borracha, ocorre um deslocamento de δ para valores menores, especialmente nas baixas frequências, o que indica aumento da componente elástica do comportamento viscoelástico. Entre os modificados, nota-se tendência de menores valores de δ com o aumento do teor de borracha, refletindo maior elasticidade e recuperação associadas à fase elastomérica incorporada.

Nas faixas de frequências mais elevadas, as curvas tendem a convergir, sugerindo que as diferenças entre as formulações se tornam menos pronunciadas em condições de carregamento rápido. Em síntese, a curva mestra de δ confirma que a modificação com borracha reduz a susceptibilidade viscosa do ligante e aumenta sua resposta elástica, sobretudo no domínio crítico de baixas frequências, o que é coerente com o desempenho superior esperado quanto à deformação permanente e com os resultados observados em ensaios como PG e MSCR.

Figura 52: Resultados das curvas mestras de ângulo de fase dos ligantes analisados



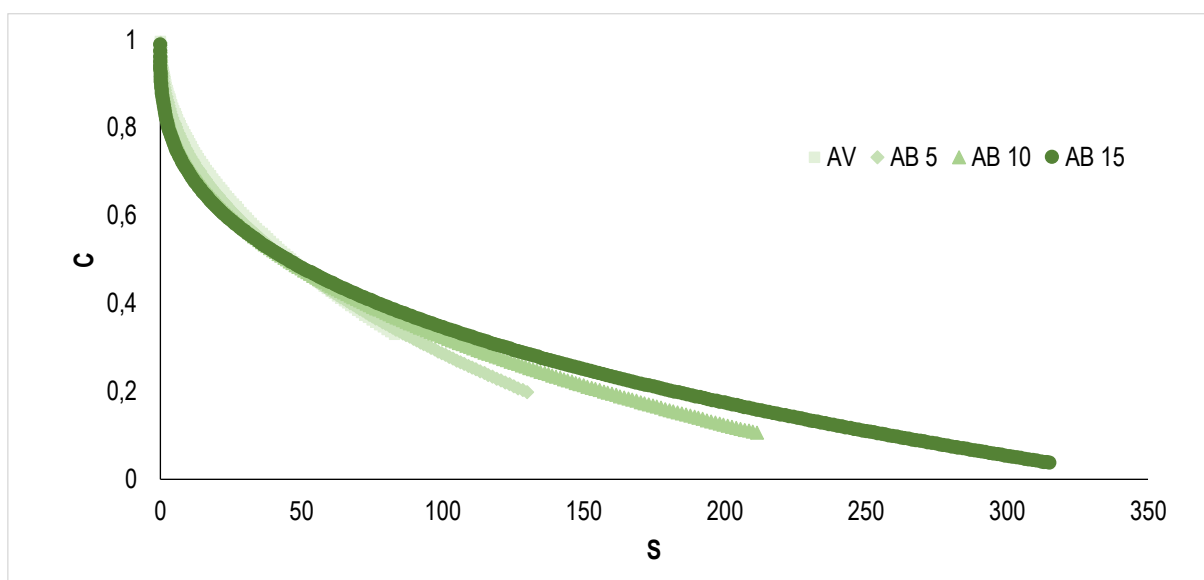
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A Figura 53 apresenta a curva integridade (C) versus dano acumulado (S) obtida a partir do tratamento do ensaio LAS para o ligante de referência (AV) e para os ligantes asfálticos com borracha (AB 5%, AB 10% e AB 15%). A interpretação dessa resposta deve ser feita em três frentes: (i) o comportamento em um mesmo nível de dano constante), (ii) a integridade no instante de ruptura e (iii) a capacidade de acumular dano até a falha, observada pelo deslocamento da curva para a direita.

Primeiro, ao comparar os ligantes em S equivalentes, nota-se que as curvas apresentam tendência semelhante, indicando que o mecanismo de degradação é análogo entre as formulações. Ainda assim, a distinção mais relevante emerge quando se avalia a capacidade de dano: Os ligantes modificados apresentam clara extensão da curva para maiores valores de S, isto é, rompem em níveis de dano acumulado superiores ao do ligante AV. Em termos práticos, isso indica que a presença de borracha aumenta a resistência ao acúmulo de dano, com ganho mais evidente para os maiores teores, especialmente AB 10% e AB 15%, que atingem valores de S significativamente mais elevados antes de colapsar.

Por fim, a integridade na ruptura também é um indicador importante. Observa-se que os ligantes que suportam maior dano tendem a alcançar a falha em níveis mais baixos de C, o que, na leitura do VECD aplicada ao LAS, significa que o material tolera uma perda de integridade mais avançada antes de romper. Assim, a combinação de curvas mais deslocadas à direita e ruptura em menor integridade sustenta a interpretação de que os ligantes modificados apresentam maior tolerância ao dano e maior resistência ao acúmulo de dano quando comparados ao ligante base (Guedes, 2024).

Figura 53: Curva de integridade (C) versus Dano (S)

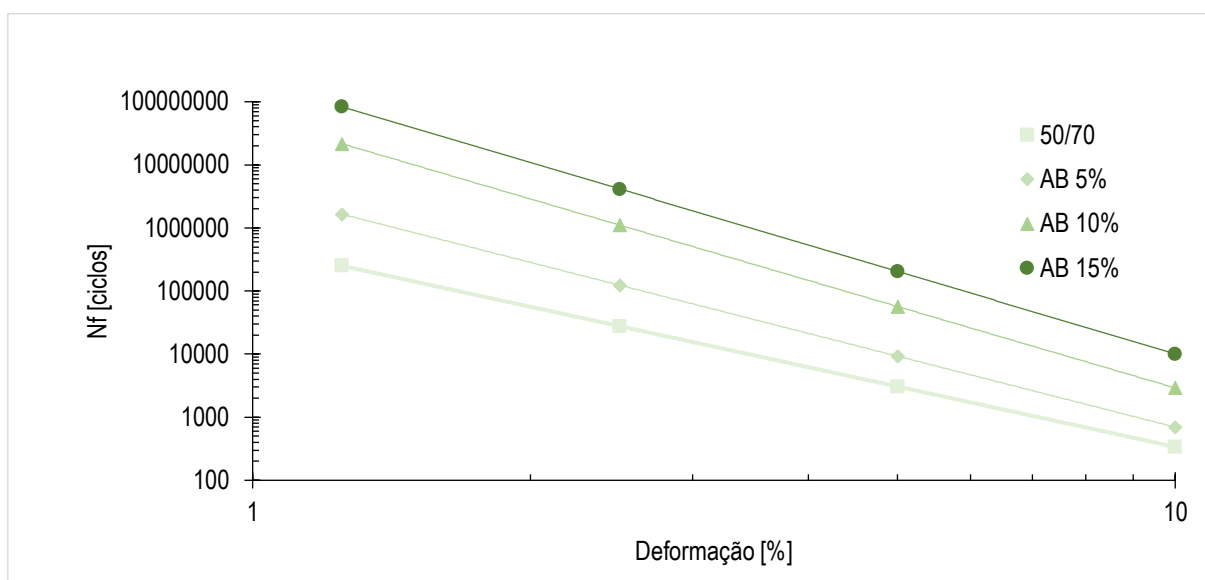


Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A Figura 54 apresenta as curvas de fadiga ($N_f \times$ deformação) obtidas a partir do tratamento do ensaio LAS para o ligante de referência (AV) e para os ligantes asfalto-borracha (AB 5%, AB 10% e AB 15%). Observa-se o comportamento típico de materiais viscoelásticos: o aumento da deformação imposta resulta em redução acentuada do número de ciclos até a falha (N_f), evidenciando a maior taxa de acumulação de dano sob níveis mais severos de sollicitação.

Comparativamente, verifica-se que os ligantes modificados apresentam maiores vidas de fadiga em toda a faixa de deformações analisada, com ganho que se intensifica à medida que o teor de borracha aumenta. Em particular, o AB 15% apresenta os maiores valores de N_f , seguido por AB 10%, AB 5% e, por último, o ligante AV, configurando um ranqueamento consistente de desempenho. Esse resultado indica que a incorporação de borracha aumenta a tolerância ao dano por fadiga, elevando a capacidade do ligante de suportar carregamentos cíclicos antes de atingir a condição de falha prevista no modelo.

Adicionalmente, nota-se que as diferenças entre as formulações se tornam mais expressivas em deformações mais baixas, condição frequentemente associada a regimes de sollicitação mais compatíveis com a resposta do ligante em serviço. Em síntese, as curvas de fadiga indicam que a modificação com borracha promove melhoria do desempenho à fadiga, o que é coerente com a interpretação das curvas $C \times S$, nas quais os ligantes modificados tendem a suportar maiores níveis de dano acumulado antes da ruptura.

Figura 54: Curvas de Fadiga para amostras analisadas

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A Figura 55 apresenta o Fator de Fadiga do Ligante determinado a 19 °C. Observa-se incremento sistemático do parâmetro com o teor de borracha, passando de 1,48 no ligante de referência (AV) para 1,70 (AB 5%), 2,01 (AB 10%) e 2,19 (AB 15%). Esse comportamento indica que a modificação com borracha promove melhoria consistente da resistência à fadiga, refletindo maior capacidade do ligante em suportar carregamentos cíclicos antes de atingir a condição de falha prevista pelo modelo.

Com base na classificação proposta por Nascimento (2015), o AV (FFL = 1,48) enquadra-se no limite inferior da classe “Superior” ($1,48 < \text{FFL} < 1,57$), enquanto os ligantes modificados AB 5%, AB 10% e AB 15% apresentam $\text{FFL} > 1,57$, sendo classificados como “Excelente”. Assim, os resultados indicam que a incorporação de borracha eleva o desempenho à fadiga do ligante, segundo esse critério, com destaque para AB 15%, que apresentou o maior FFL entre as formulações avaliadas.

Figura 55: Fator de Fadiga do Ligante determinado a 19 °C (FFL)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Os resultados de estabilidade à estocagem (Tabela 15) obtidos pelo método tradicional do ponto de amolecimento (PA) evidenciam um gradiente térmico entre topo e base para os ligantes com menores teores de borracha, comportamento típico de sistemas com tendência à segregação durante o armazenamento em condição quente. Para o AB 5, observaram-se valores de PA no topo de 52 °C e na base de 59 °C, com $\Delta PA \approx 7$ °C, enquanto para o AB 10 o topo variou entre 57 e 57,5 °C e a base entre 63,5 e 64,5 °C, resultando em ΔPA médio de 6,75 °C. Em contrapartida, para o AB 15 os valores foram praticamente coincidentes (67–68 °C no topo e 68 °C na base), com ΔPA médio de apenas 0,5 °C, indicando um sistema significativamente mais estável.

Tabela 15: Resultado do ensaio de estabilidade a estocagem das amostras analisadas

Código	PA Topo estimado (°C)	PA Base estimado (°C)	ΔPA estimado (°C)	Média
AV	-	-	-	-
AB 5 amostra 1	52	59	7	7
AB 5 amostra 2	52	59	7	
AB 10 amostra 1	57.5	63.5	6	6.75
AB 10 amostra 2	57	64.5	7.5	
AB 15 amostra 1	67	68	1	0.5
AB 15 amostra 2	68	68	0	

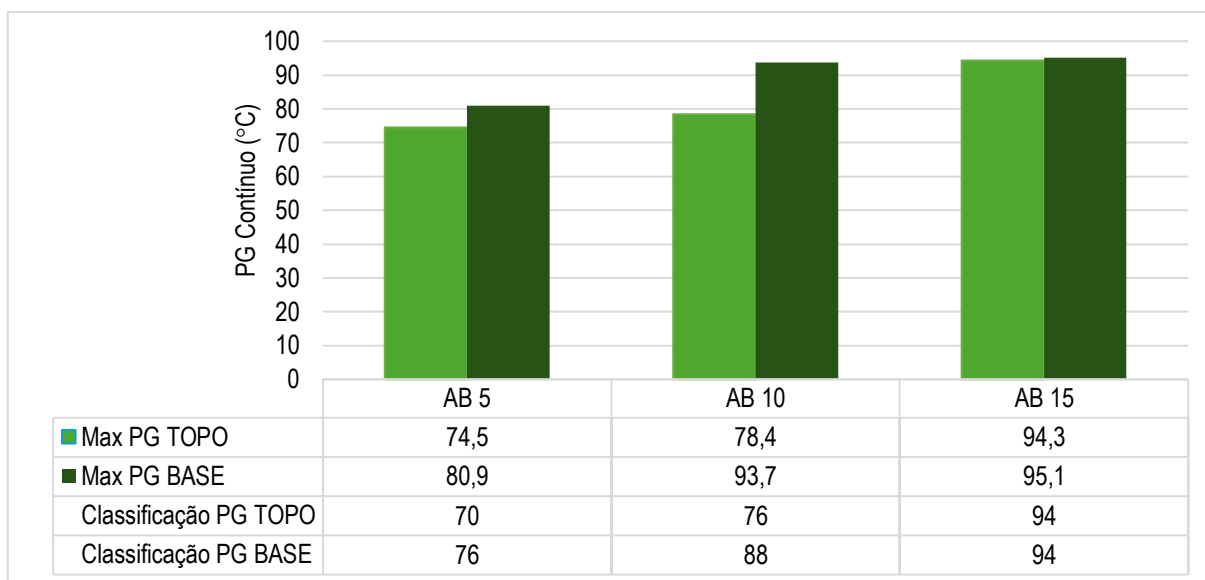
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Do ponto de vista físico, a elevação do PA na base em relação ao topo é consistente com a hipótese de não homogeneidade vertical do material após estocagem, associada a mecanismos como separação de fases ou migração e concentração de frações com maior contribuição elástica na porção inferior do recipiente, alterando a resposta térmica do ligante. Esse diagnóstico se alinha ao que é preconizado pela DNIT 111/2009-EM, que estabelece a verificação da estabilidade à estocagem pela diferença do ponto de amolecimento entre topo e base, adotando como critério de aceitação uma variação máxima de 9 °C (método DNER ME 384/99). Assim, à luz do limite normativo, os três teores avaliados permaneceram em condição aceitável.

Entretanto, embora o ΔPA seja um indicador consolidado para triagem de estabilidade, ele fornece uma leitura essencialmente “pontual”, vinculada à temperatura característica do ensaio, sem explicitar como a eventual segregação se manifesta ao longo do espectro viscoelástico relevante para o desempenho. Nesse sentido, a incorporação de parâmetros reológicos avançados, PG e curvas-mestre, amplia a interpretação ao conectar a estabilidade à estocagem a propriedades diretamente associadas ao comportamento do ligante em altas temperaturas.

Os resultados de PG contínuo e de classificação PG (Figura 56) confirmam a tendência observada no PA para o AB 5, em que a base apresenta graduação superior ao topo (PG contínuo 74,5 °C no topo e 80,9 °C na base; classes 70 e 76, respectivamente), coerente com diferença da ordem de 6–7 °C, alinhada ao Δ PA. Para o AB 15, a proximidade entre topo e base também se mantém no PG (PG contínuo 94,3 °C no topo e 95,1 °C na base; classe 94 em ambos), reforçando a interpretação de homogeneidade e estabilidade do sistema nesse teor. Contudo, o AB 10 se destaca por apresentar uma discrepância muito mais expressiva quando avaliado por PG: o PG contínuo passa de 78,4 °C (topo) para 93,7 °C (base), enquanto as classes evoluem de 76 para 88, evidenciando que, apesar de o Δ PA médio estar em torno de 6–7 °C, a segregação pode estar produzindo uma diferença reológica de maior magnitude do ponto de vista de desempenho. Em termos práticos, isso significa que o material do topo e o material da base podem apresentar níveis distintos de resistência em alta temperatura, o que é particularmente crítico porque essa faixa de comportamento é diretamente relacionada à suscetibilidade à deformação permanente.

Figura 56: Resultado do ensaio de PG das amostras estudadas separando topo e base após estocagem

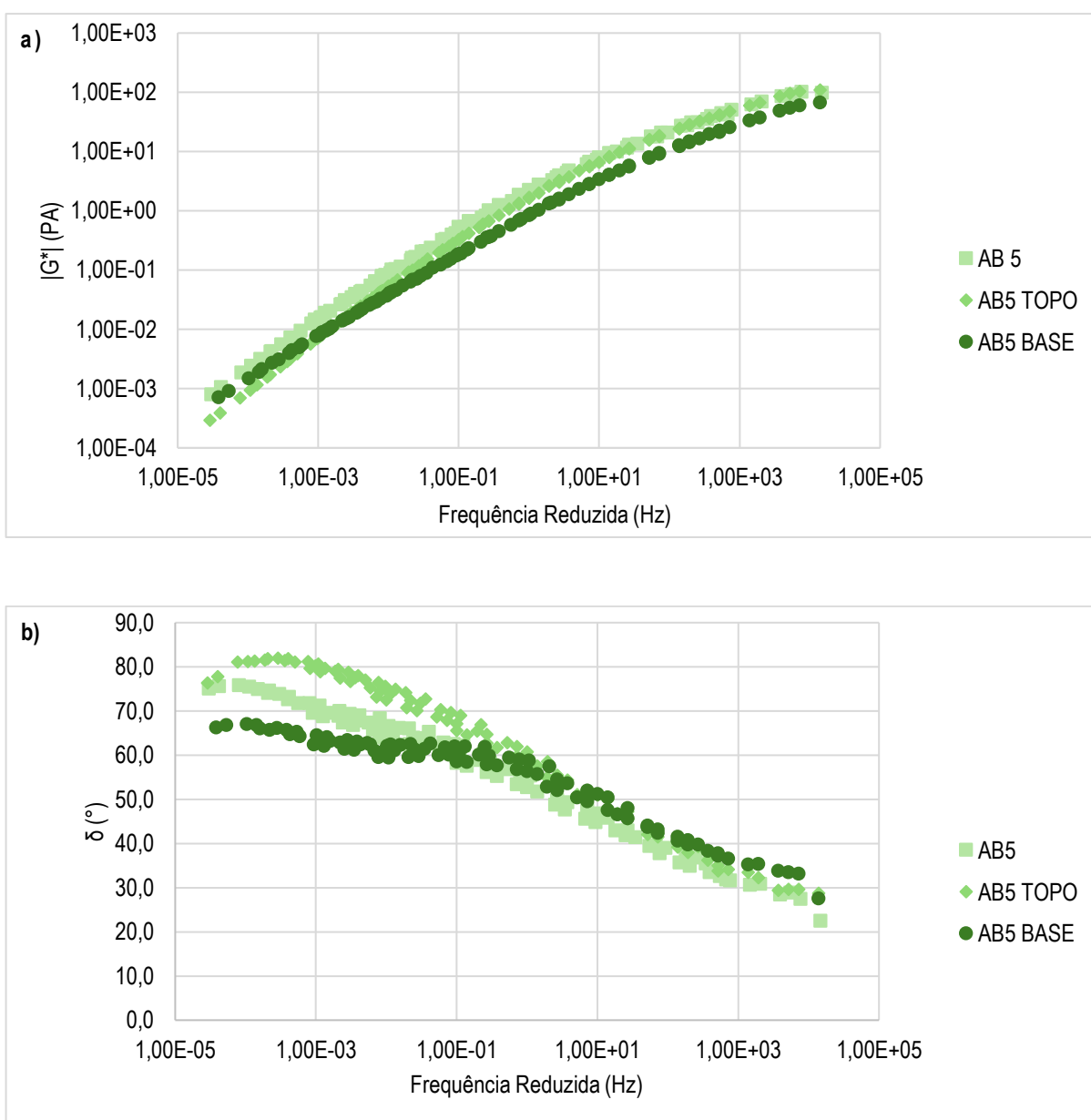


Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A análise torna-se ainda mais robusta quando se observam as curvas-mestras de $|G^*|$ e δ^* (Figura 57, 58 e 59), pois elas permitem verificar se topo e base mantêm resposta semelhante ao longo de uma ampla faixa de frequência reduzida, representativa de diferentes combinações de tempo e temperatura. Para os ligantes AB 5 e AB 10, nota-se uma separação consistente entre os conjuntos de dados de topo e base em porções relevantes do domínio, indicando que a não homogeneidade não se restringe a um deslocamento discreto de temperatura, mas envolve alterações no balanço viscoso–

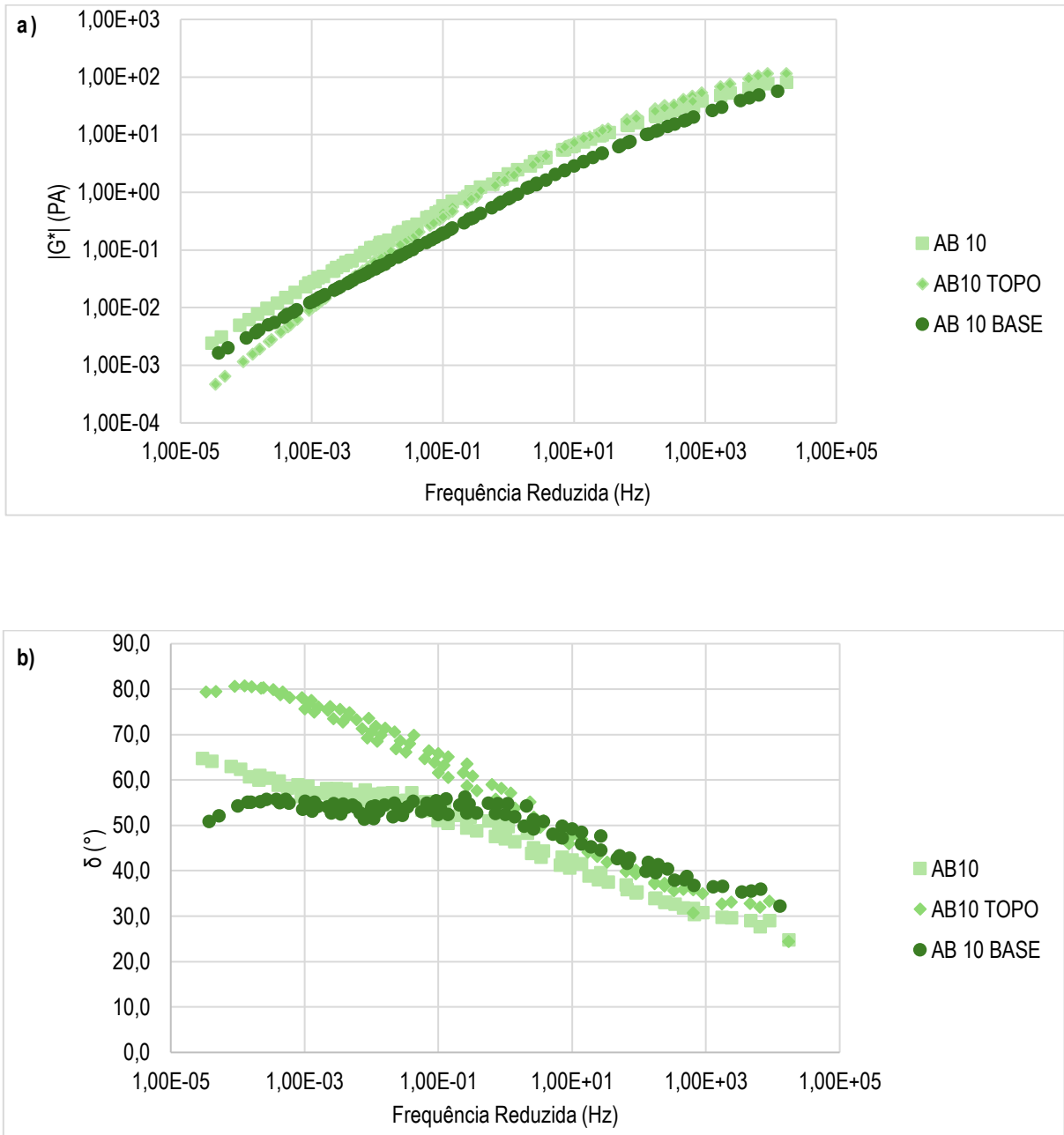
elástico do ligante. A variação concomitante de $|G^*|$ e de δ sugere que a segregação afeta não apenas a rigidez (magnitude do módulo), mas também a natureza da resposta, com implicações diretas sobre o caráter recuperável (elástico) e não recuperável (viscoso) sob carregamentos repetidos em altas temperaturas. Já no AB 15, a tendência de sobreposição ou proximidade entre topo e base nas curvas-mestre indica que o material preserva uma resposta reológica mais uniforme, compatível com a baixa diferença observada tanto no ΔPA quanto no PG, o que sugere melhor compatibilização do sistema com maior teor de borracha.

Figura 57: Resultados de curvas mestras de $|G^*|$ (a) e δ^* (b) asfalto contendo 5% de borracha



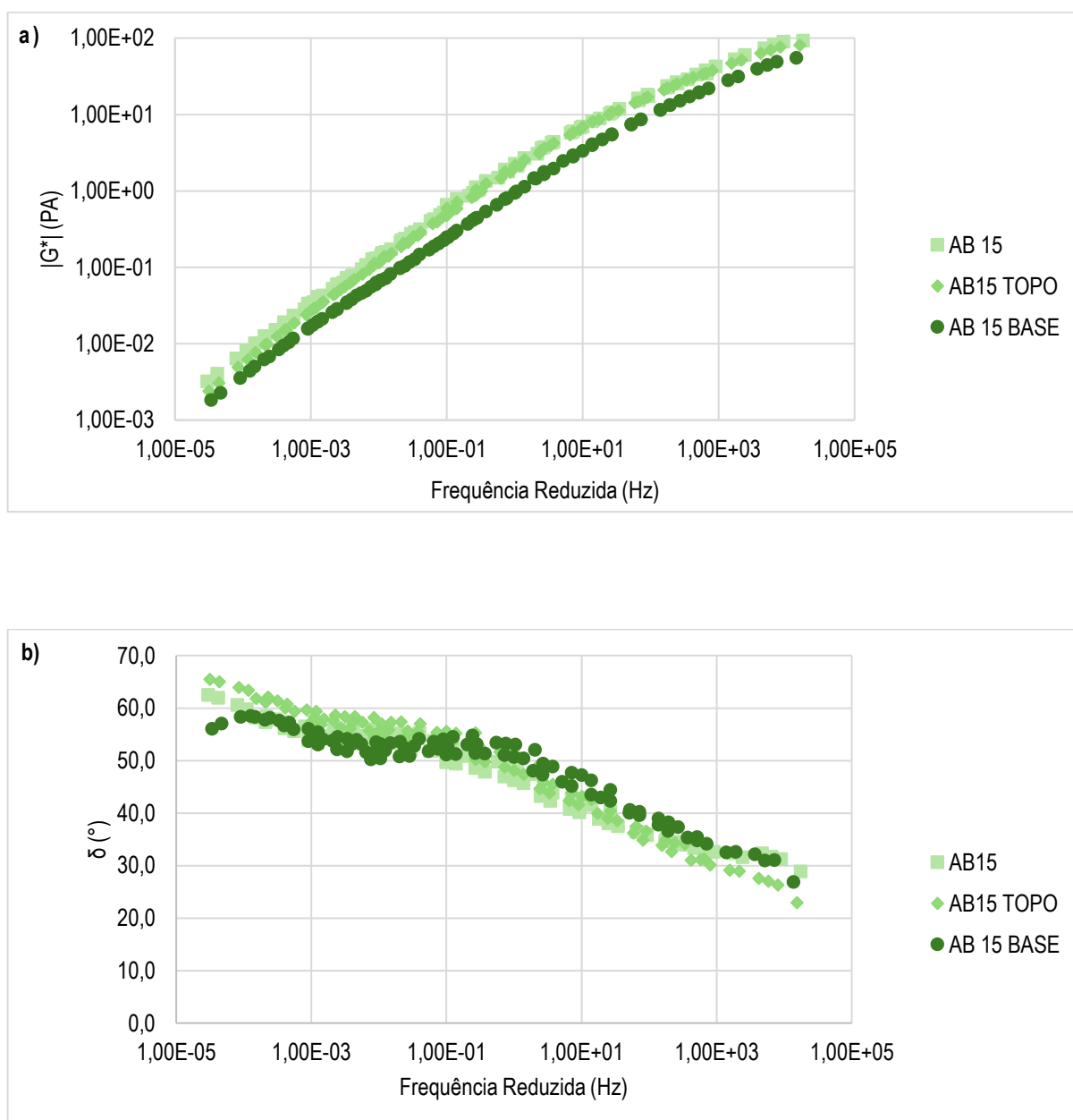
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 58: Resultados de curvas mestras de $|G^*|$ (a) e δ^* (b) asfalto contendo 10% de borracha



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 59: Resultados de curvas mestras de $|G^*|$ (a) e δ^* (b) asfalto contendo 15% de borracha



Fonte: Autor (2026)

Dessa forma, a comparação entre o método tradicional e os parâmetros avançados permite concluir que PA, PG e curvas-mestre são complementares, mas não equivalentes. O ΔPA confirma a existência (ou não) de segregação térmica após estocagem e aponta com clareza a estabilidade superior do AB 15; contudo, o PG e as curvas-mestre qualificam essa segregação ao demonstrar seu impacto no comportamento reológico de alta temperatura, isto é, no conjunto de propriedades mais diretamente ligado ao desempenho frente à deformação permanente. Em especial, o caso do AB 10 evidencia que o PA pode subestimar a relevância funcional da segregação: embora o ΔPA seja semelhante ao do AB5 e permaneça abaixo do limite de 9 °C da DNIT 111/2009-EM, o PG e a assinatura reológica indicam uma

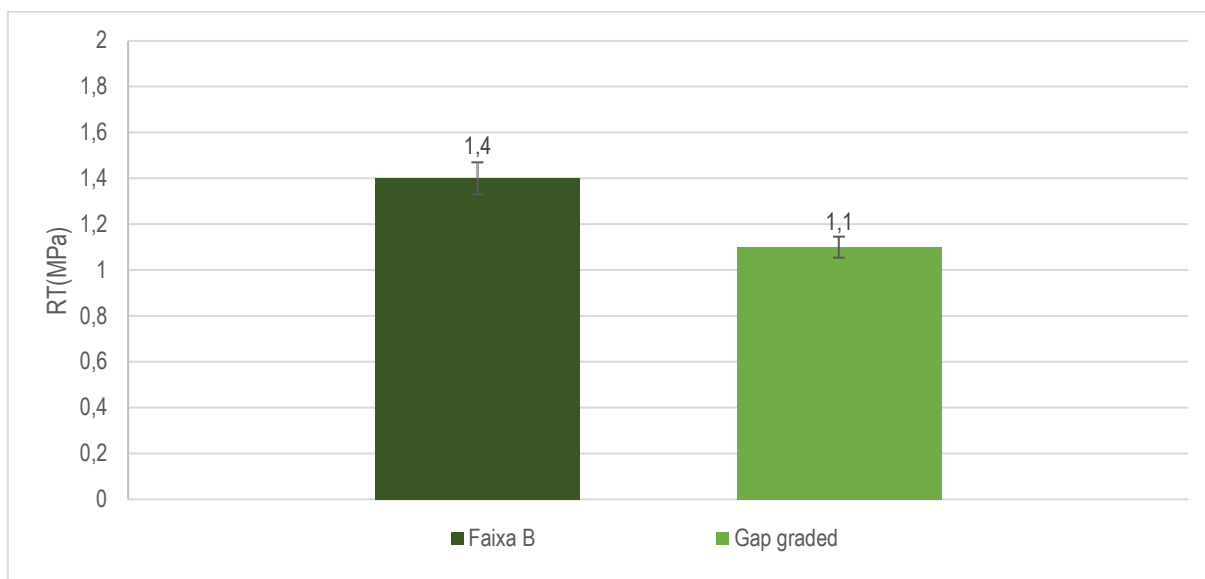
discrepância muito maior entre topo e base, sugerindo que a estocagem pode levar à formação de porções com graduações e respostas viscoelásticas distintas dentro do mesmo ligante. Nesse cenário, é tecnicamente adequado afirmar que a estabilidade à estocagem pode servir como subsídio para a dosagem de borracha, não como critério único, mas como condicionante de viabilidade operacional e homogeneidade, em conjunto com parâmetros de desempenho e trabalhabilidade. Assim, a escolha por seguir com o teor de 10% de borracha pode ser justificada por atender às especificações normativas do DNIT; entretanto, a evidência reológica avançada indica que esse teor foi o mais suscetível à separação de fases, o que implica a necessidade de maior rigor de controle em estocagem (tempo, temperatura e agitação/recirculação) e reforça a importância de incorporar PG e curvas-mestre como ferramentas para discriminar, entre teores “aceitáveis”, aquele que apresenta maior robustez reológica e menor risco de variabilidade em campo.

4.2. Ensaio mecânicos

Neste tópico, apresentam-se os resultados da avaliação mecânica das misturas asfálticas, obtidos por meio dos ensaios de resistência à tração (RT), estabilidade Marshall, módulo de resiliência (MR), carga repetida uniaxial (*Flow Number*), módulo dinâmico (MD), dano por umidade induzida (DUI), fadiga por tração direta uniaxial cíclica a 25 °C e *Stress Sweep Rutting* (SSR).

4.2.1. Resistência à tração (RT)

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral (RT) foram determinados de acordo com o procedimento normativo aplicável, seguindo as diretrizes do DNIT 136/2018-ME. A Figura 60 apresenta os resultados de RT das misturas Faixa B (graduação densa, Vv de projeto de 4%) e gap-graded (graduação descontínua, Vv de projeto de 5%), ambas produzidas com o ligante AB 10 (10% de borracha LGF-40P) desenvolvido nesta pesquisa. Para cada mistura foram ensaiados três corpos de prova, obtendo-se RT média de 1,4 MPa para a Faixa B e RT média de 1,1 MPa para a gap-graded, valores esses que atendem aos especificados pela norma DNIT 112/2009 – ES que são de 0,75 MPa para camada de rolamento Faixa B e 0,50 MPa para Faixa de rolamento Gap graded.

Figura 60: Resultados de resistência à tração por compressão diametral

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

O maior valor de RT observado na Faixa B é coerente com o efeito da estrutura granulométrica contínua/densa, que tende a favorecer o intertravamento e a formação de um esqueleto mineral mais estável, proporcionando melhor distribuição de tensões e menor concentração de deformações locais. A literatura reconhece que a granulometria do agregado é um fator central no desempenho, afetando diretamente ou indiretamente propriedades como estabilidade e durabilidade, e distinguindo o comportamento entre misturas contínuas e descontínuas (Lee; Dutt, 1971). Em misturas gap-graded, a descontinuidade granulométrica pode aumentar a dependência da matriz (ligante + filer) na transferência de esforços, tornando a resposta mais sensível à volumetria e à conectividade de vazios, especialmente em solicitações de tração indireta.

Adicionalmente, a diferença no volume de vazios entre as misturas (4% e 5%) contribui para a redução de RT na gap-graded. Estudos experimentais e de modelagem mostram que características relacionadas aos vazios (teor, estrutura e distribuição) têm influência marcante na resistência à tração indireta, e que o aumento do teor de vazios tende a reduzir parâmetros associados ao desempenho no ensaio (Peng *et al.*, 2021). Resultados laboratoriais também indicam que misturas com menor teor de vazios (por exemplo, 4%) apresentam melhor resposta no ensaio de resistência à tração indireta quando comparadas a misturas com maiores teores de vazios (Khanghahl *et al.*, 2021). Assim, o menor Vv e a granulometria densa atuam de forma combinada para elevar a RT da Faixa B.

Em termos comparativos, observa-se que valores de RT podem variar de forma expressiva mesmo para misturas com asfalto-borracha, em função do arranjo interno induzido pela granulometria e

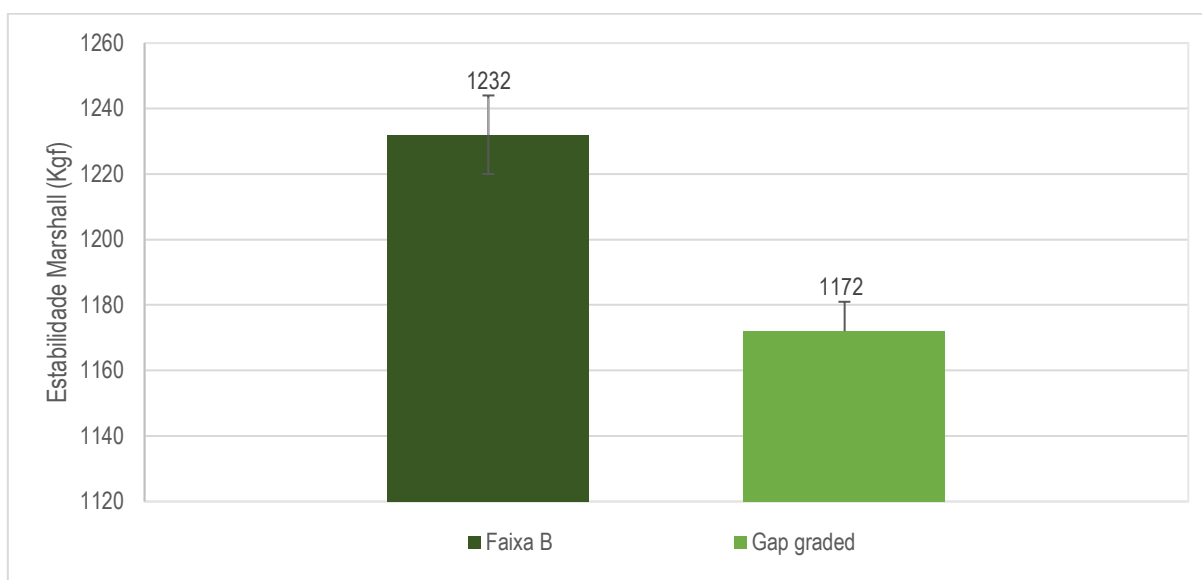
pela compactação. Nunes (2017), ao estudar uma mistura com asfalto-borracha com 10% de borracha enquadrada na Faixa C do DNIT (curva contínua/bem graduada), com Faixa de Agregados Dominantes (FAD) entre 2,0 e 4,8 mm, reportou RT de 0,66 MPa (compactação Marshall) e 0,78 MPa (compactação SUPERPAVE) (Nunes, 2017). Esses resultados, além de evidenciarem a influência do método de compactação, reforçam que o valor de RT não é controlado apenas pelo tipo/teor de borracha no ligante, mas pela combinação entre estrutura granulométrica, volumetria e condições de densificação que governam a transferência de tensões no ensaio

Em avaliações experimentais com seções reais de pavimento, misturas contendo ligante modificado com borracha apresentaram aumento de resistência à tração indireta em relação à mistura convencional, evidenciando potencial de melhoria do comportamento sob solicitações de tração indireta (Shan *et al.*, 2022). Nesse sentido, os resultados obtidos indicam que o ligante AB 10 foi capaz de fornecer um nível adequado de coesão e integridade às duas misturas; contudo, o valor de RT foi governado, predominantemente, pela estrutura granulométrica e pela condição volumétrica. Em outras palavras, mesmo tendo o ligante modificado como ponto em comum, a mistura Faixa B apresentou RT superior por combinar esqueleto mais contínuo e menor teor de vazios, ao passo que a gap-graded, por sua natureza descontínua e Vv mais elevado, apresentou menor resistência à tração indireta, evidenciando a influência da granulometria no desempenho à RT.

4.2.2. Estabilidade Marshall

Os resultados de estabilidade Marshall foram obtidos conforme os procedimentos e critérios estabelecidos na norma DNIT 447/2024-ME, a qual define as condições de condicionamento térmico dos corpos de prova, a velocidade de aplicação de carga e o número mínimo de réplicas para garantir representatividade estatística dos valores médios apresentados a seguir.

A Figura 61 apresenta os resultados de estabilidade Marshall para as misturas produzidas com o ligante AB 10, com médias de 1232 kgf (Faixa B) e 1172 kgf (gap-graded). Observa-se diferença de aproximadamente 5% entre as duas misturas, indicando maior capacidade da Faixa B de suportar carregamentos sem perda de estabilidade na condição de ensaio. Do ponto de vista normativo, ambos os resultados atendem aos valores mínimos estabelecidos para concreto asfáltico com asfalto-borracha: ≥ 800 kgf para camada de rolamento e ≥ 700 kgf para gap graded, conforme a DNIT 112/2009-ES, evidenciando conformidade das misturas com os requisitos de aceitação para estabilidade Marshall.

Figura 61: Resultados de estabilidade Marshall

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A maior estabilidade Marshall observada na Faixa B é compatível com o efeito de uma graduação densa na formação de um esqueleto mineral mais contínuo e intertravado, condição que tende a elevar o atrito interno e a eficiência na transferência de tensões, aumentando a carga máxima suportada antes do início do fluxo plástico. Esse comportamento é coerente com resultados comparativos reportados na literatura, nos quais misturas densamente graduadas apresentam estabilidade Marshall superior à de misturas do tipo SMA em determinadas condições de dosagem (Rashed; Al-Hadidy, 2023).

Por outro lado, em misturas de graduação descontínua, parte maior da resistência passa a depender do mástique (ligante + fíler) e do arranjo entre agregados graúdos, o que pode reduzir a estabilidade quando o intertravamento não domina o comportamento. Para misturas com borracha, esse efeito é particularmente relevante, pois a modificação pode se manifestar de forma distinta conforme a graduação: Ban *et al.* (2025) observaram aumento de estabilidade em SMA, mas redução em misturas do tipo densas, reforçando que o desempenho no ensaio Marshall resulta da interação entre ligante modificado e estrutura granulométrica.

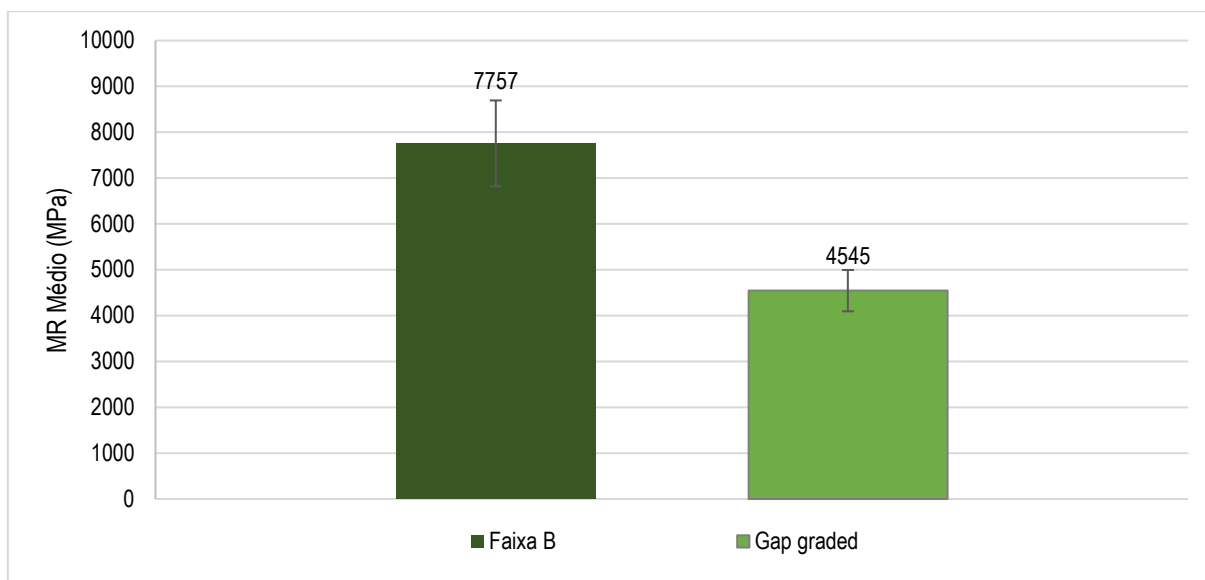
4.2.3. Módulo de resiliência (MR)

Os resultados de módulo de resiliência (MR) foram obtidos conforme o procedimento estabelecido na ASTM D7369:2020.

A Figura 62 apresenta os resultados de MR médios das misturas produzidas com o ligante AB 10, com médias de 7757 MPa para a Faixa B e 4545 MPa para a gap-graded (três corpos de prova por mistura). Observa-se que a Faixa B apresentou rigidez aproximadamente 71% superior (ou, equivalentemente, a

gap-graded cerca de 41% inferior), indicando maior capacidade de recuperar deformações sob carga repetida. Essa diferença é consistente com a influência da granulometria no arranjo e no contato entre agregados: misturas com esqueleto mineral mais contínuo tendem a apresentar maior rigidez e resposta elástica mais pronunciada, enquanto estruturas descontínuas dependem mais do mástique para transferir esforços, o que pode reduzir o MR. Evidências recentes reforçam que o projeto granulométrico tem impacto essencial nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas, alterando sua resposta em tração indireta e em condições de carregamento cíclico (LV *et al.*, 2023).

Figura 62: Resultados de módulo de resiliência



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Em Nunes (2017), para a mistura com asfalto-borracha contendo 10% de borracha (AB 10%), foram obtidos MR = 2.089 MPa (compactação Marshall) e MR = 3.357,67 MPa (compactação SUPERPAVE), evidenciando aumento de rigidez com a maior energia de compactação. No presente estudo, os valores médios foram superiores, com MR de 7.757 MPa (Faixa B) e MR de 4.545 MPa (gap-graded), ambas produzidas com o ligante AB 10, indicando que a rigidez recuperável foi mais elevada, principalmente para a estrutura densa.

Essa diferença pode ser associada às particularidades de dosagem e estrutura interna: Nunes (2019) utilizou mistura enquadrada na Faixa C do DNIT, com FAD entre 2,0 e 4,8 mm, além de volumetria e teor de ligante próprios do seu traço, fatores que condicionam o arranjo do esqueleto mineral e a efetividade da matriz ligante-fíler na transferência de tensões.

Do ponto de vista de desempenho, valores mais elevados de MR tendem a estar associados a menor deformação elástica e, em muitos cenários, a maior resistência a trilhas de roda, uma vez que a rigidez do material influencia a resposta estrutural frente à deformação (Do *et al.*, 2025). Por outro lado,

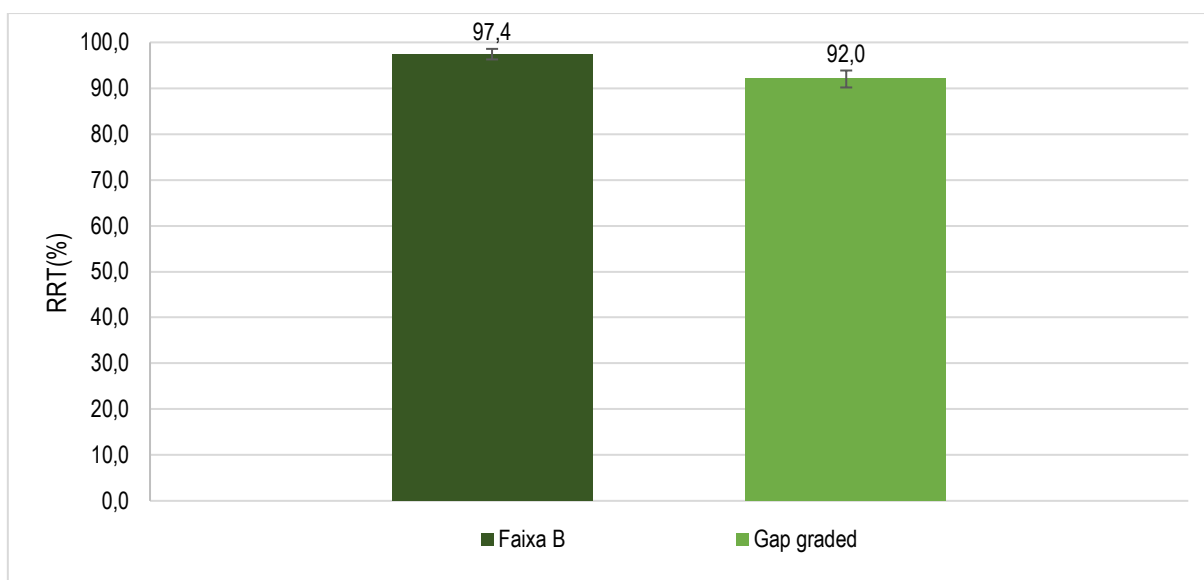
uma mistura mais rígida pode aumentar concentrações de tensão em condições críticas e, dependendo da temperatura e do nível de deformação, não necessariamente representar melhor comportamento à fadiga, o que reforça a necessidade de interpretar o MR conjuntamente com outros indicadores de desempenho.

Além disso, o MR é sensível à condição de dosagem e às variáveis de ensaio. Estudos recentes mostram que alterações no teor de ligante e na temperatura modificam significativamente os valores obtidos em laboratório (Bastidas-Martínez *et al.*, 2024). Nesse contexto, os resultados do presente estudo indicam que, mantendo-se o mesmo ligante modificado (AB 10), a estrutura granulométrica permaneceu como fator dominante na rigidez recuperável, explicando o maior MR da Faixa B em relação à gap-graded.

4.2.4. Dano por umidade induzida (DUI).

Os resultados do ensaio de Dano por Umidade Induzida (DUI) foram obtidos conforme a norma DNIT 180/2018-ME. A Figura 63 apresenta os valores de RRT obtidos para as misturas produzidas com o ligante AB 10, com médias de 97,4% para a Faixa B e 92,0% para a gap-graded, indicando que não teve perda de resistência após a ação da umidade. A diferença de 5,4 % da RRT em favor da Faixa B sugere menor susceptibilidade ao dano por umidade quando comparada à mistura descontínua. Em termos de aceitação, os resultados atendem ao critério normativo de que a razão entre resistências antes e após condicionamento/imersão deve ser superior a 0,7, conforme indicado na DNIT 112/2009-ES para avaliação da resistência de misturas compactadas à degradação produzida pela umidade.

Figura 63: Resultado do ensaio de dano por umidade induzida (DUI)



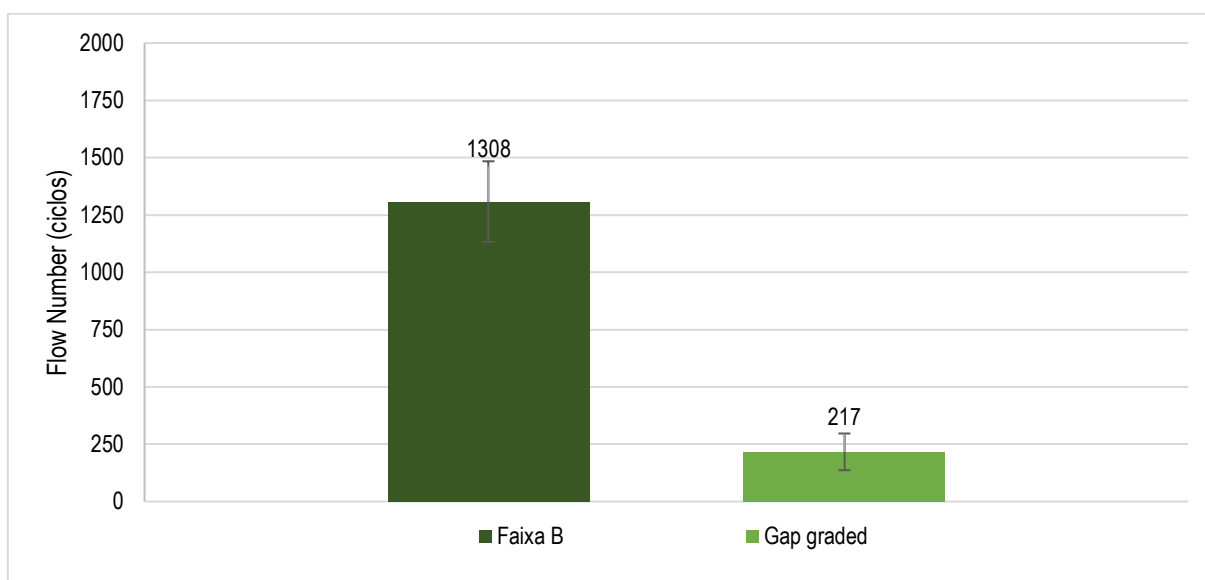
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Do ponto de vista mecanístico, valores de RRT próximos de 100% indicam que o condicionamento imposto promoveu perda reduzida de integridade, refletindo melhor manutenção das ligações adesivas e coesivas. A superioridade da Faixa B é coerente com o papel da estrutura interna na limitação do avanço da água e na preservação dos contatos agregado–agregado: em misturas com esqueleto mineral mais contínuo/intertravado, tende a haver menor dependência do mástique para a transferência de esforços, o que contribui para reduzir a probabilidade de falhas por perda de aderência e/ou enfraquecimento coesivo quando há presença de umidade. Esse entendimento está alinhado com discussões recentes sobre dano por umidade, que destacam os mecanismos adesivos e coesivos como centrais para a degradação de misturas asfálticas (Neupane *et al.*, 2025).

Adicionalmente, a presença de borracha no ligante pode contribuir para elevar a resistência ao dano por umidade ao alterar a interação ligante–agregado e a resposta do mástique, embora a literatura ressalte que esse efeito pode variar com materiais e dosagem. Estudos recentes discutem o desempenho de ligantes modificados com borracha quanto à resistência de ligação e à sensibilidade à umidade (LV *et al.*, 2023) e relatam, em resultados laboratoriais, tendência de aumento do TSR/RRT com o incremento de teor de borracha em misturas produzidas por via úmida, indicando menor susceptibilidade ao dano por umidade em determinadas condições (Al-Soudany *et al.*, 2023). Assim, os valores elevados de RRT obtidos para ambas as misturas sugerem que o ligante AB 10 forneceu um nível adequado de resistência frente à ação da água, contudo, a diferença entre as graduações reforça que a estrutura granulométrica permanece determinante para o desempenho no DUI, explicando a maior retenção observada na mistura densa.

4.2.5. Flow number (FN)

A Figura 64 apresenta os resultados de FN das misturas produzidas com o ligante AB 10, com médias de 1308 ciclos (Faixa B) e 217 ciclos (gap-graded), considerando três corpos de prova por mistura. Observa-se diferença expressiva, com a Faixa B apresentando FN aproximadamente seis vezes superior, o que indica maior capacidade de retardar a evolução da deformação permanente nas condições do ensaio.

Figura 64: Resultado do ensaio de *Flow Number* (FN)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A discrepância observada nos valores de FN pode ser explicada, em grande parte, pelas condições severas do ensaio, em especial a tensão aplicada de 600 kPa e o critério de parada por deformação acumulada de 50.000 $\mu\epsilon$. Nessas condições, a mistura gap-graded, por apresentar granulometria descontínua e ter sido moldada com maior teor de vazios para o ensaio, tende a depender mais do mástique na transferência de esforços e a desenvolver rearranjos internos com maior rapidez. Assim, ocorre uma acomodação mais acelerada da estrutura, com incremento mais rápido da deformação permanente acumulada, fazendo com que o corpo de prova atinja o critério de parada em menor número de ciclos e, conseqüentemente, resulte em FN mais baixo.

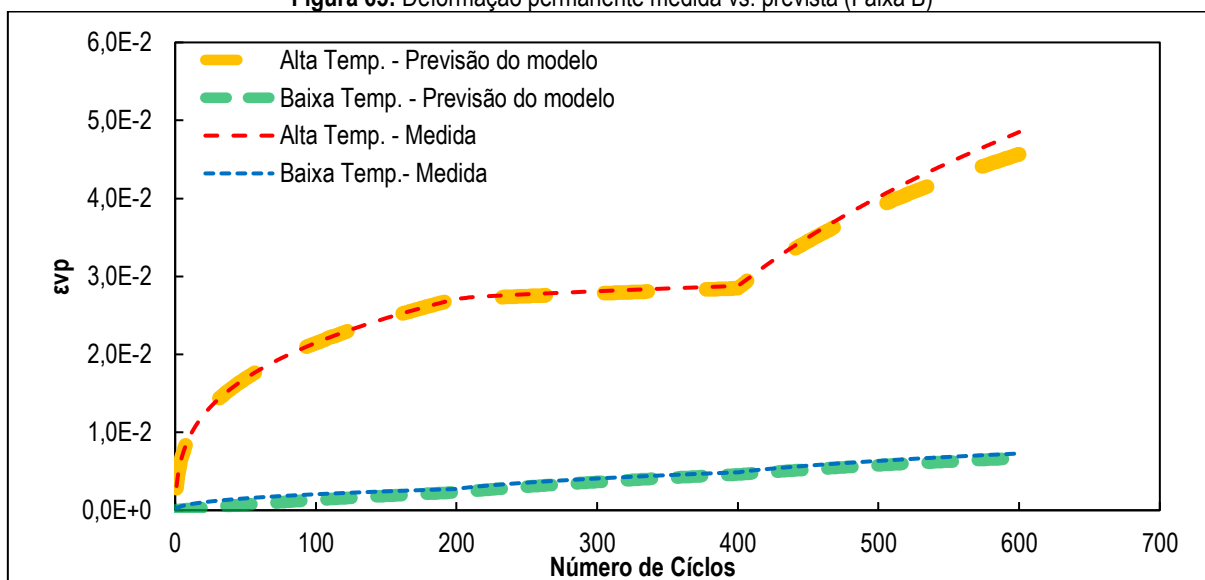
Em contraste, a mistura Faixa B, por possuir estrutura mais densa e ter sido ensaiada com menor V_v , apresenta maior intertravamento entre os agregados e maior estabilidade do esqueleto mineral frente ao cisalhamento cíclico. Esse arranjo favorece a redistribuição de tensões e dificulta a mobilização de deformações viscoplásticas em curto prazo, retardando o acúmulo de deformação até 50.000 $\mu\epsilon$ e, portanto, levando a um FN mais elevado.

Esses resultados indicam que, sob tensão elevada e com critério de interrupção baseado em deformação acumulada, o FN pode se tornar fortemente sensível à faixa granulométrica e à volumetria de ensaio, de modo que sua interpretação isolada deve ser feita com cautela. Nesse contexto, o Flow Number pode não representar de forma consistente a resistência à deformação permanente para diferentes estruturas granulométricas, sendo recomendável correlacionar sua resposta com outros indicadores de deformação permanente (por exemplo, SSR e parâmetros viscoelásticos em altas temperaturas) para uma avaliação mais robusta do desempenho.

4.2.6. Stress Sweep Rutting

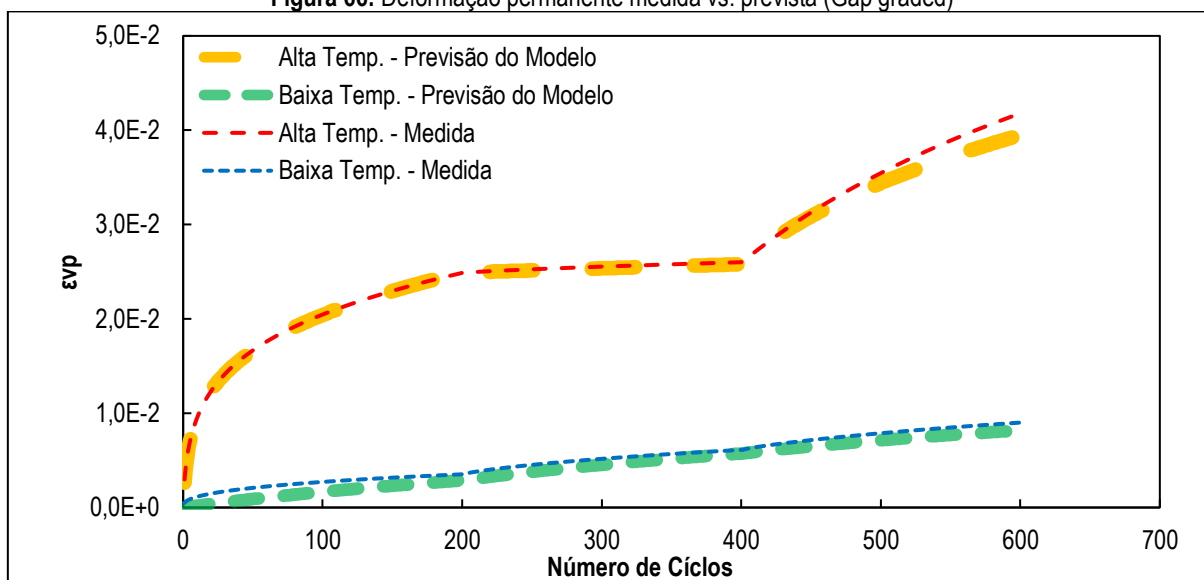
Nas Figuras 65 e 66 apresenta-se a evolução da deformação permanente axial viscoplástica (ϵ_{vp}) ao longo do ensaio de SSR, comparando-se os valores medidos no AMPT com aqueles estimados pelo modelo de deformação permanente do tipo shift calibrado a partir do próprio SSR. O procedimento seguiu as diretrizes da AASHTO TP 134 (com adaptações nas temperaturas), empregando duas condições térmicas, baixa temperatura e alta temperatura ($T_L = 32\text{ °C}$ e $T_H = 66\text{ °C}$), tensão confinante constante de 70 kPa, pré-condicionamento de 20 min para estabilização térmica e aplicação do confinamento, e carregamento repetido total de 600 ciclos por temperatura, distribuídos em três blocos de 200 ciclos com diferentes níveis de tensão desviadora; em T_L os blocos foram aplicados em ordem crescente (483, 689 e 896 kPa) e em T_H foi adotada a inversão dos dois primeiros níveis (689, 483 e 896 kPa), conforme prática recomendada para a condição de alta temperatura, além de pulsos de 0,4 s e repouso de 3,6 s (T_H) e 1,6 s (T_L) (AASHTO, 2022).

Figura 65: Deformação permanente medida vs. prevista (Faixa B)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 66: Deformação permanente medida vs. prevista (Gap graded)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

De modo geral, observa-se que as curvas em TH apresentam magnitudes de ϵ_{vp} muito superiores às obtidas em TL, o que confirma o efeito dominante da temperatura elevada na intensificação do escoamento viscoplástico e, conseqüentemente, na suscetibilidade à deformação permanente. Em TL, as deformações permanecem em patamar baixo e com crescimento suave, indicando um regime de resposta mais rígido e com menor propensão à acumulação irreversível, enquanto em TH o crescimento de ϵ_{vp} é substancialmente maior e mais sensível às transições entre blocos de tensão (Kim, 2009; Coffey *et al.*, 2023).

A forma das curvas em TH evidencia mudanças de inclinação e pequenos patamares ao longo do histórico de ciclos, comportamento compatível com a execução em blocos: quando o ensaio transita entre níveis de tensão desviadora, a taxa de acumulação de ϵ_{vp} tende a se reorganizar, podendo resultar em trechos com crescimento mais rápido e/ou com estabilização temporária antes do próximo aumento efetivo de sollicitação. Nessa lógica, o modelo shift busca capturar a dependência tensão-temperatura para reproduzir a trajetória de ϵ_{vp} e apoiar interpretações mecanicistas, o que é corroborado pela boa proximidade entre as curvas medidas e previstas nas duas temperaturas e para ambas as misturas (Kim, 2009; FHWA, 2021).

Ao comparar as composições, observa-se que, em TH, a mistura Faixa B atinge valores finais de deformação permanente viscoplástica, ϵ_{vp} , adimensional (mm/mm), ligeiramente superiores aos da gap-graded (Faixa B = $4,85 \times 10^{-2}$, equivalente a 4,85% ou 48.500 $\mu\epsilon$; Gap-graded = $4,18 \times 10^{-2}$, equivalente a 4,18% ou 41.800 $\mu\epsilon$), sugerindo maior propensão ao acúmulo de deformação permanente em condição crítica. Em TL, ambas as misturas permanecem em níveis reduzidos (Faixa B = $7,28 \times 10^{-3}$, aproximadamente 0,728% ou 7.280 $\mu\epsilon$), com a gap-graded apresentando deformação final

discretamente superior ($9,01 \times 10^{-3}$ aproximadamente 0,901% ou $9.010 \mu\epsilon$). Esse comportamento pode estar associado ao controle volumétrico adotado (8% de vazios na gap-graded e 7% na Faixa B), uma vez que variações no teor de vazios tendem a aumentar a sensibilidade a rearranjos internos e a microfluxos viscoplásticos sob carregamento repetido (Coffey *et al.*, 2023).

Por fim, apesar do aumento mais pronunciado em TH e das inflexões associadas à troca de blocos, não se observa uma aceleração progressiva contínua típica de uma zona terciária bem definida ao longo de cada bloco, indicando que o ensaio transcorreu de forma estável e favoreceu a comparação entre materiais e o ajuste do modelo (AASHTO, 2022; Kim, 2009).

A interpretação desses resultados torna-se mais completa quando se integra o SSR ao *Flow Number* (FN) (Figura 55). Enquanto o SSR descreve a trajetória de acumulação de ϵ_{vp} sob um histórico multinível de tensões e sustenta a calibração do modelo, o FN evidencia com maior sensibilidade a estabilidade ao fluxo sob condição constante e severa. Assim, embora o SSR aponte diferenças relativamente pequenas no nível de deformação acumulada ao final do ensaio, o *Flow Number* mostrou uma diferença marcante, com FN muito superior para a Faixa B, indicando maior resistência à transição para fluxo acelerado sob carregamento repetido.

Em conjunto, os resultados sugerem que a mistura gap-graded pode não acumular mais deformação no histórico *multistress* do SSR, porém apresenta menor resistência ao início do fluxo acelerado, aspecto observado pelo FN substancialmente menor, consolidando a superioridade da Faixa B quanto à estabilidade frente à deformação permanente nas condições críticas avaliadas (Coffey *et al.*, 2023; AASHTO, 2022).

A interpretação dos resultados fica mais clara quando se explicita o papel físico-matemático dos parâmetros calibrados. No *Shift Model*, os coeficientes da curva de referência (ϵ_0 , N_1 e β) descrevem a forma básica da evolução da deformação permanente viscoplástica com o número de ciclos em uma condição de referência (após a “redução” feita pelo modelo). O parâmetro ϵ_0 representa a deformação permanente inicial (associada à acomodação primária do material no início do carregamento); N_1 atua como um parâmetro de escala/transição, relacionado à forma com que a curva evolui e muda de regime com o aumento do número de aplicações; e β controla a taxa de crescimento na fase de evolução mais regular, governando a inclinação do crescimento em regime secundário. Em paralelo, os parâmetros p_1 e p_2 compõem o *shift* por tempo de carregamento, representando a sensibilidade do material ao tempo efetivo de aplicação de carga. Por fim, os coeficientes d_1 e d_2 descrevem o *shift* por nível de tensão vertical, isto é, a dependência com a severidade do estado de tensões no pavimento, obtendo a natureza não linear da deformação permanente quando a tensão aumenta. Esses parâmetros e suas diferenças percentuais entre as misturas (incluindo os fatores associados a tempo e tensão) estão sintetizados na Tabela 16, a qual é usada como base para a interpretação comparativa a seguir.

Tabela 16: Coeficientes do Shift Model e variações relativas entre misturas

Mistura	ϵ_0	N1	β	p1	p2	d1	d2
Faixa B	4.66E-03	1.1	0.67	0.68	0.27	0.1	-1.28
Gap graded	5.79E-03	1.97	0.72	0.62	0.25	0.12	-1.89

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Ao analisar os coeficientes da curva de referência, observa-se que o Gap-graded apresentou $\epsilon_0 = 5,79E-03$, superior ao da Faixa B ($\epsilon_0 = 4,66E-03$). Esse resultado sugere maior deformação permanente inicial do Gap-graded, compatível com uma fase de acomodação mais pronunciada no início do carregamento. Entretanto, ϵ_0 não deve ser interpretado isoladamente como indicativo de pior desempenho, pois a deformação permanente em horizonte de projeto é controlada principalmente pela forma como a deformação se acumula ao longo dos ciclos e pela sensibilidade às variáveis de carregamento e clima. Nesse sentido, os parâmetros N1 e β indicam uma tendência mais favorável do Gap-graded no longo prazo: o N1 do Gap-graded (1,97) é superior ao da Faixa B (1,10), indicando modificação relevante na escala de evolução do fenômeno e sugerindo maior capacidade de sustentar ciclos sem intensificar precocemente a acumulação; além disso, o β do Gap-graded (0,72) supera o da Faixa B (0,67), coerente com uma evolução mais controlada na fase em que o crescimento se torna mais regular, reduzindo a taxa de acumulação por ciclo em comparação à Faixa B.

A interpretação mecanística fica mais clara com os coeficientes de shift por tempo de carregamento. Conforme indicado na Tabela 16, o Gap-graded apresentou $p_1 = 0,62$ e $p_2 = 0,25$, enquanto a Faixa B apresentou $p_1 = 0,68$ e $p_2 = 0,27$. Como p_1 e p_2 quantificam a sensibilidade ao tempo efetivo de carregamento, valores menores indicam que o Gap-graded tende a ser menos sensível a condições que amplificam a viscoplasticidade, como tráfego mais lento, permanência maior da carga e situações típicas de altas temperaturas. Esse resultado é importante porque a deformação permanente em campo é fortemente intensificada em condições de maior temperatura e maior “tempo de solicitação”, e a menor sensibilidade do Gap-graded ajuda a explicar sua vantagem nas simulações climáticas, sobretudo nos cenários mais severos.

Quanto aos coeficientes de shift por nível de tensão vertical, também sintetizados na Tabela 16, observa-se que o Gap-graded apresentou $d_1 = 0,12$ e $d_2 = -1,89$, enquanto a Faixa B apresentou $d_1 = 0,10$ e $d_2 = -1,28$. Como d_1 e d_2 caracterizam a dependência com a tensão e a não linearidade do comportamento, a maior magnitude de d_2 no Gap-graded indica uma resposta mais não linear frente ao aumento da tensão vertical. Contudo, esse aspecto não invalida o melhor desempenho global do Gap-graded no cenário padronizado do FlexMAT; ele apenas reforça que o efeito da tensão é relevante e que a resposta não é estritamente proporcional ao nível de solicitação. O desempenho final deve ser

interpretado como resultado do conjunto de parâmetros, incluindo a forma da curva de referência e os shifts por tempo e tensão.

Com os dados do SSR devidamente tratados no FlexMAT, realizou-se a aplicação do Shift Model, que descreve o comportamento viscoplástico da mistura em função da temperatura e do nível de tensão. Essa etapa é fundamental porque o *Rutting Strain Index* (RSI) não é obtido como uma leitura direta do ensaio; trata-se de um indicador calculado por simulação, cuja estimativa depende do modelo calibrado para reproduzir a evolução da deformação permanente observada experimentalmente. Em seguida, foi definido o cenário de simulação de referência no FlexMAT — contemplando estrutura do pavimento, tráfego e clima — de modo a estimar a deformação permanente em condições padronizadas e, assim, permitir a comparação entre misturas sob uma mesma base de análise.

Como o banco climático disponível no FlexMAT é constituído por registros meteorológicos de localidades dos Estados Unidos, adotou-se uma correlação climática para representar, de forma aproximada, as condições das cinco macrorregiões brasileiras. Para isso, selecionaram-se cidades norte-americanas com características climáticas semelhantes às de cada região do Brasil, viabilizando o uso dos arquivos meteorológicos do software e a obtenção do RSI em diferentes cenários ambientais. As correspondentes cidades estabelecidas, bem como os valores de RSI calculados para as misturas gap-graded (RSI GG) e Faixa B (RSI FB), são apresentados na Tabela 17.

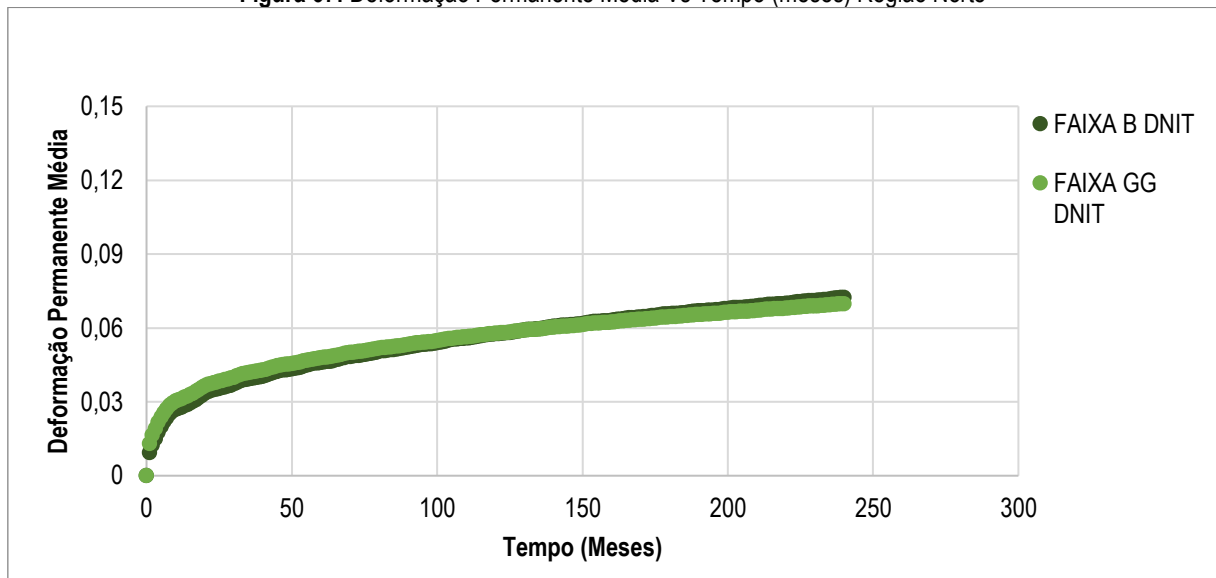
Tabela 17: Correlação climática Brasil–EUA adotada no FlexMAT e valores de RSI (%)

Região BR	Clima	Cidade EUA	Estado EUA	RSI GG (%)	RSI FB (%)
Norte	Equatorial úmido	Hilo	Hawaii - HL	6.97	7.22
Nordeste	Semiárido	Phoenix	Arizona - AZ	9.03	10.9
Sul	Subtropical	Houston	Texas - TX	8.14	9.3
Sudeste	Tropical de altitude	Orlando	Flórida - FL	7.75	8.55
Centro oeste	Tropical continental	El Paso	Texas - TX	8.1	9.3

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

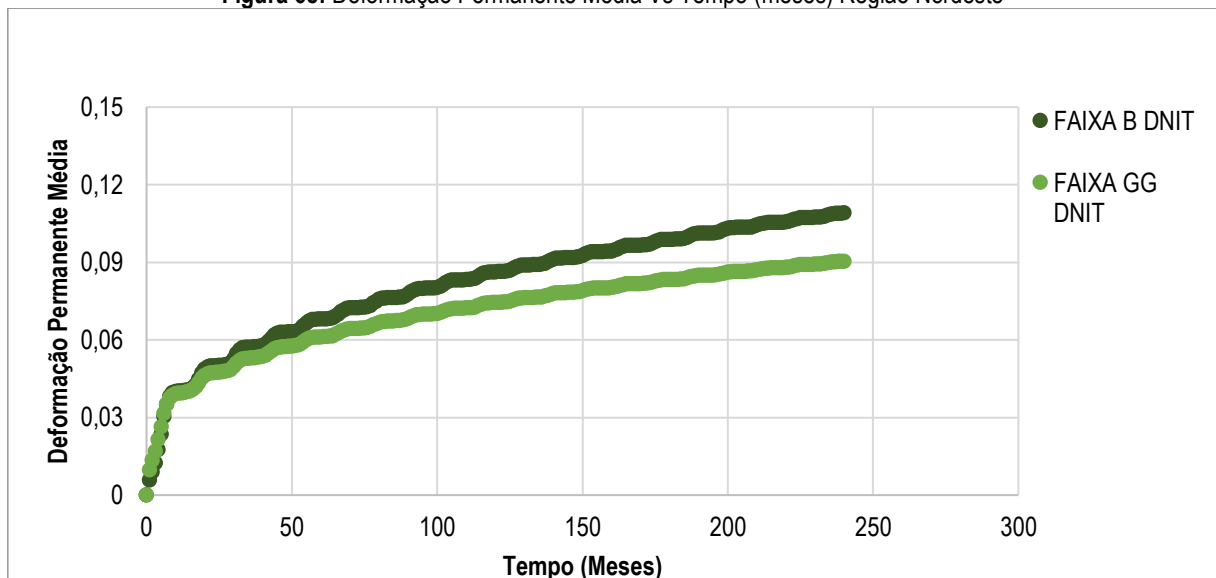
As Figuras 67 a 71 apresentam a evolução da Deformação Permanente Média ao longo do tempo (em meses) para um horizonte de aproximadamente 240–250 meses, considerando cinco cenários climáticos representativos das macrorregiões brasileiras (Norte - equatorial úmido, Nordeste - semiárido, Sul - subtropical, Sudeste - tropical de altitude e Centro-Oeste - tropical continental). Em cada figura, são comparadas duas composições granulométricas estudadas neste trabalho, permitindo avaliar simultaneamente o efeito das condições ambientais e do tipo de mistura sobre o acúmulo de deformação permanente sob o mesmo cenário de simulação, além de evidenciar diferenças de magnitude e de taxa de crescimento do dano ao longo da vida de projeto.

Figura 67: Deformação Permanente Média Vs Tempo (meses) Região Norte



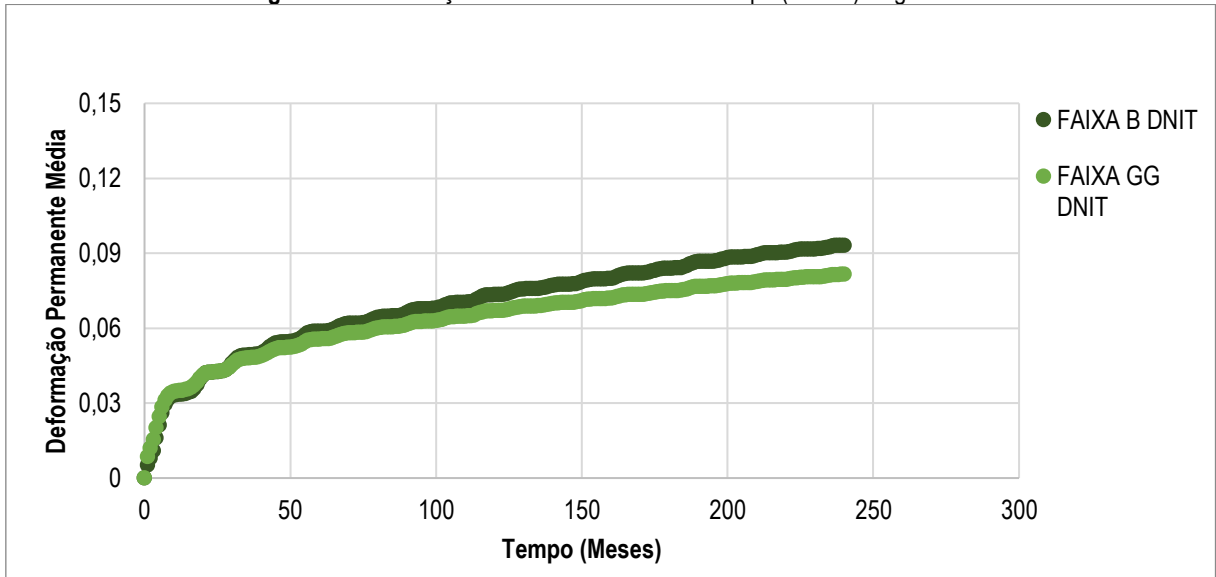
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 68: Deformação Permanente Média Vs Tempo (meses) Região Nordeste



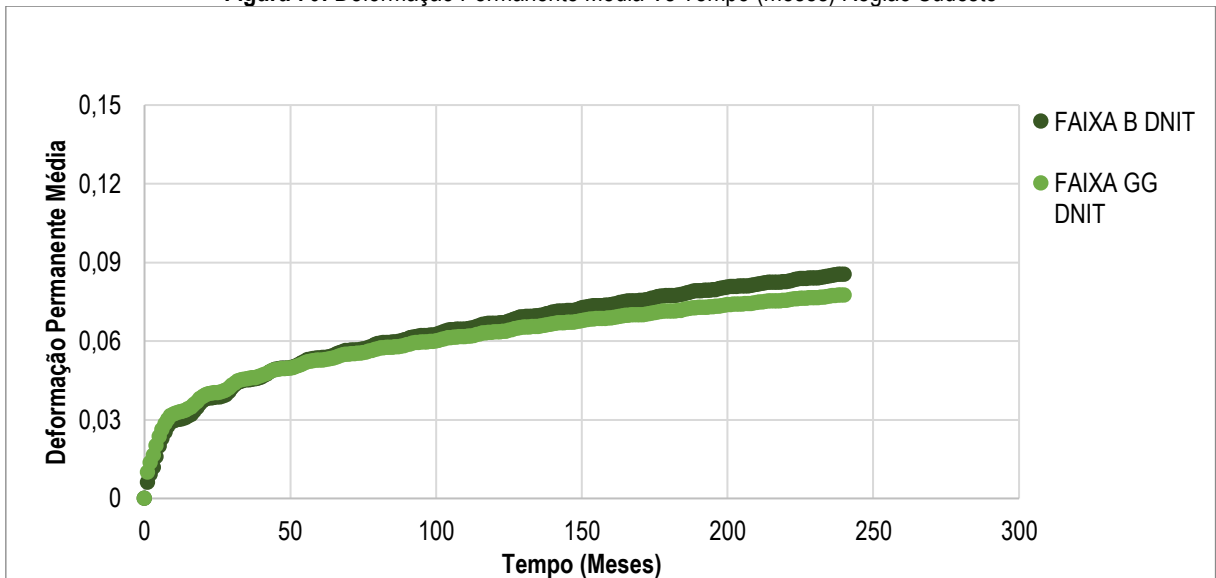
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 69: Deformação Permanente Média Vs Tempo (meses) Região Sul



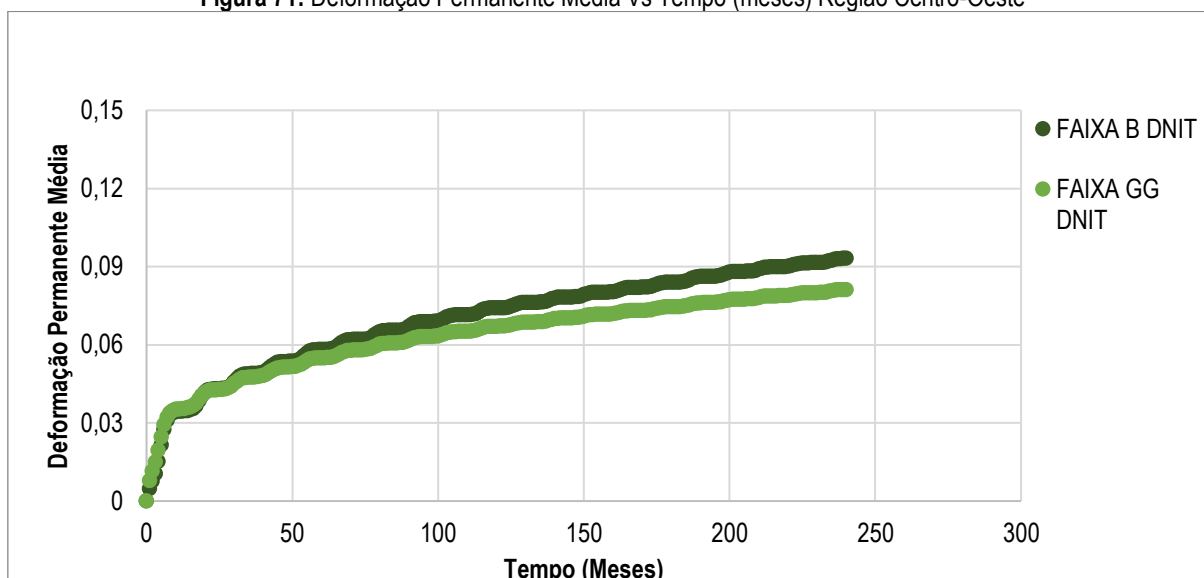
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 70: Deformação Permanente Média Vs Tempo (meses) Região Sudeste



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 71: Deformação Permanente Média Vs Tempo (meses) Região Centro-Oeste



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Com base nos gráficos e na Tabela 17, observa-se que a resposta de deformação permanente média ao longo do tempo apresenta comportamento típico de acúmulo não linear, com crescimento mais acelerado nos estágios iniciais e redução progressiva da taxa de evolução à medida que o horizonte de análise avança. Esse padrão, evidenciado pela curvatura côncava das curvas, é consistente com um mecanismo em que parte da deformação é mobilizada rapidamente (acomodação inicial do material/estrutura e maior suscetibilidade em condições térmicas críticas), passando posteriormente a um regime de acúmulo mais gradual. Assim, além do valor final ao término do período analisado (20 anos), os gráficos permitem interpretar a cinética de acumulação por meio da inclinação das curvas em diferentes fases, distinguindo situações em que a mistura tende a estabilizar mais cedo de cenários em que a deformação continua a se acumular a taxas relativamente mais elevadas.

Ao comparar as macrorregiões, os resultados indicam diferenças claras de severidade climática. O clima da Região Norte (equatorial úmido) apresenta os menores níveis de deformação permanente média ao longo de todo o período, atingindo ao final valores próximos de 0,07 para ambas as faixas, com reduzida separação entre as curvas. Em contraste, o clima da Região Nordeste (semiárido) se destaca como o cenário mais crítico, alcançando aproximadamente 0,11 para a Faixa B e cerca de 0,09 para a Faixa GG, além de manter uma taxa de crescimento mais pronunciada e um afastamento mais evidente entre os materiais ao longo do tempo. As Regiões Sul (subtropical) e Centro-Oeste (tropical continental) situam-se em um patamar intermediário, com deformações finais próximas de 0,09 (Faixa B) e 0,08 (Faixa GG), enquanto a Região Sudeste (tropical de altitude) tende a apresentar severidade ligeiramente menor que Sul e Centro-Oeste, com valores finais na ordem de 0,085 (Faixa B) e 0,078 (Faixa GG). Esse conjunto de curvas permite, portanto, uma classificação de severidade do ponto de vista do acúmulo de

deformação permanente no cenário padronizado: Norte (menos severo) < Sudeste < Sul \approx Centro-Oeste < Nordeste (mais severo).

Além da comparação entre climas, as figuras evidenciam o efeito do tipo de mistura. Em todas as regiões, a Faixa GG permanece sistematicamente abaixo da Faixa B, indicando menor deformação permanente média e, conseqüentemente, melhor desempenho previsto quanto à deformação permanente no período analisado. Entretanto, um aspecto relevante é que essa diferença não é constante: em climas menos severos (como o Norte), as curvas são próximas, sugerindo menor sensibilidade do desempenho relativo ao tipo de faixa; já em climas mais severos (principalmente o Nordeste), a separação se amplia, indicando que a vantagem da Faixa GG se torna mais significativa quando as condições ambientais impõem maior demanda viscoplástica. Em outras palavras, isso aponta que a Faixa GG apresenta maior robustez climática, mantendo menores níveis de deformação e menor crescimento relativo em cenários críticos.

A Tabela 17 reforça e quantifica essas interpretações ao apresentar a correlação climática Brasil–EUA adotada no FlexMAT e os respectivos valores de *Rutting Strain Index* (RSI). Como o RSI é um indicador derivado do modelo calibrado (e não uma leitura direta do ensaio), sua função é sintetizar numericamente a propensão à deformação permanente sob condições padronizadas. Os valores de RSI seguem a mesma tendência observada nas curvas de deformação permanente: a Região Norte apresenta os menores índices (RSI-GG = 6,97% e RSI-Faixa B = 7,22%), coerente com as menores deformações previstas; a Região Nordeste apresenta os maiores índices (RSI-GG = 9,03% e RSI-Faixa B = 10,9%), condizente com as maiores deformações e com a taxa de acúmulo mais elevada; já Sul, Sudeste e Centro-Oeste situam-se em níveis intermediários (com RSI variando aproximadamente entre 7,75% e 9,3%). Além disso, em todas as regiões a Faixa B apresenta RSI superior ao da Faixa GG, confirmando que, no modelo, a Faixa B é mais suscetível à deformação permanente. A amplitude dessa diferença também é informativa: ela é menor em clima menos severo (Norte) e maior no clima mais crítico (Nordeste), reproduzindo exatamente o comportamento de maior afastamento entre curvas observado nos gráficos.

Para interpretar os valores de RSI em termos de nível de tráfego admissível, adotou-se a classificação proposta pela FHWA, na qual valores menores de RSI indicam maior resistência à deformação permanente, conseqüentemente, permitem níveis de tráfego mais severos. Nesse enquadramento, consideram-se os seguintes limiares: RSI < 12 \rightarrow tráfego Padrão (Standard – S), RSI < 4 \rightarrow tráfego pesado (Heavy – H), RSI < 2 \rightarrow tráfego muito pesado (Very Heavy – V) e RSI < 1 \rightarrow tráfego extremamente pesado (Extremely Heavy – E). Como, para todas as regiões e para ambas as faixas granulométricas, os valores de RSI permaneceram entre 4 e 12, conclui-se que todas as

combinações avaliadas se enquadram na classe de tráfego padrão (S) pelo critério de deformação permanente.

Assim, a classificação por região e faixa é:

- **Norte:** GG = 6,97% → Padrão (S) | Faixa B = 7,22% → Padrão (S);
- **Nordeste:** GG = 9,03% → Padrão (S) | Faixa B = 10,9% → Padrão (S), com valor mais próximo do limite superior (12);
- **Sul:** GG = 8,14% → Padrão (S) | Faixa B = 9,3% → Padrão (S);
- **Sudeste:** GG = 7,75% → Padrão (S) | Faixa B = 8,55% → Padrão (S);
- **Centro-Oeste:** GG = 8,1% → Padrão (S) | Faixa B = 9,3% → Padrão (S).

Em termos comparativos, embora todas permaneçam enquadradas como tráfego Padrão (S), observa-se que o Nordeste, especialmente para a Faixa B, apresenta os maiores valores de RSI, indicando condição climática mais crítica e menor margem até o limite de classificação.

Em síntese, as Figuras 67 a 71, em conjunto com a Tabela 17, permitem uma interpretação integrada do desempenho à deformação permanente no cenário adotado, articulando (i) a magnitude da deformação permanente ao longo do tempo (patamar final e evolução global), (ii) a taxa de acumulação (fase inicial mais acelerada e regime posterior mais estável) e (iii) o efeito combinado do clima e do tipo de mistura no desempenho relativo (diferença entre Faixa B e Faixa GG e sua amplificação em condições mais severas). No âmbito mecanístico, essa leitura temporal e climática é coerente com os parâmetros calibrados no FlexMAT: embora a mistura Gap-graded (Faixa GG) apresente maior deformação inicial (ϵ_0), seus parâmetros de curva de referência (N_1 e β) indicam uma evolução mais controlada ao longo dos ciclos, refletindo menor tendência de crescimento em regime mais estável. Além disso, os coeficientes associados ao tempo de carregamento (p_1 e p_2) apontam menor sensibilidade da Faixa GG a condições que intensificam o fluxo viscoplástico — aspecto particularmente relevante quando se passa de climas mais amenos para climas de maior severidade térmica e operacional.

Por sua vez, a dependência com tensão (d_1 e d_2) confirma o caráter não linear da deformação, indicando que o nível de solicitação influencia a resposta de forma não proporcional; ainda assim, o desempenho padronizado consolidado no RSI e nas curvas de deformação ao longo do tempo confirma o melhor comportamento global da Faixa GG no conjunto de cenários avaliados. Em termos práticos, observa-se que climas mais críticos (com destaque para o semiárido do Nordeste, que concentra os maiores patamares e taxas de acumulação e, conseqüentemente, os maiores valores de RSI) demandam soluções com maior resistência à deformação permanente, seja pela seleção de misturas mais robustas (como a Faixa GG), seja pelo controle mais rigoroso de variáveis de projeto e execução (estrutura, tráfego e compactação). Assim, os resultados indicam que a vantagem relativa da Faixa GG tende a se tornar

mais evidente à medida que aumenta a severidade climática e a demanda viscoplástica, reforçando a necessidade de compatibilizar seleção de materiais e parâmetros de projeto com o ambiente de serviço, sobretudo em condições mais suscetíveis ao acúmulo de deformação permanente.

4.2.7. Fadiga

Para viabilizar a aplicação do Modelo Viscoelástico de Dano Contínuo (VECD), torna-se necessária a caracterização prévia do comportamento viscoelástico das misturas por meio do ensaio de módulo dinâmico. Os ensaios foram realizados nas temperaturas de 4 °C, 20 °C e 40 °C e, posteriormente, as curvas obtidas em cada condição isotérmica foram trasladadas para uma temperatura de referência, de modo a compor as curvas mestras. A descrição matemática dessas curvas foi obtida mediante ajuste por função sigmoideal.

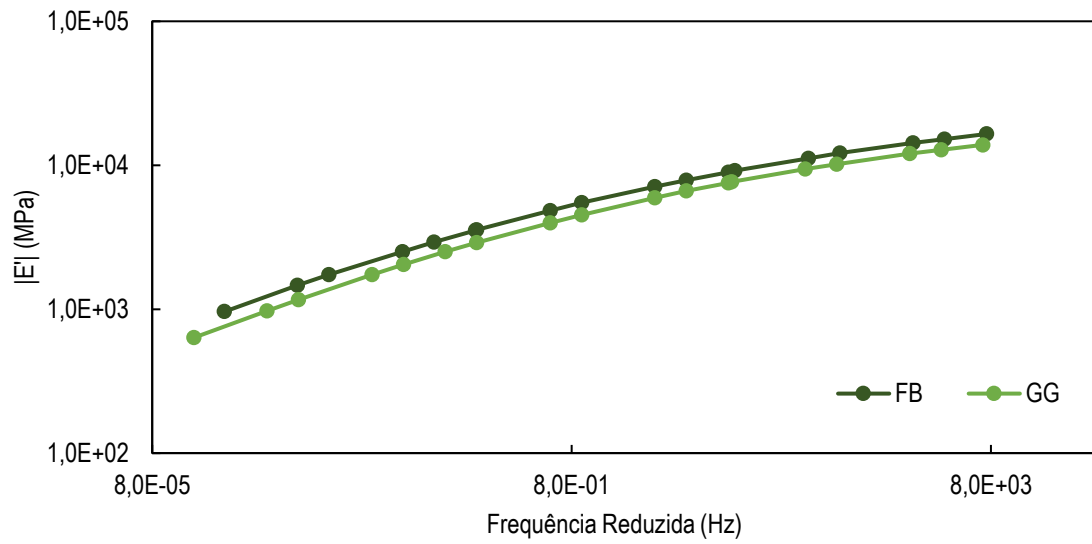
Os parâmetros provenientes do ajuste sigmoideal das curvas mestras e os coeficientes associados às funções polinomiais empregadas na determinação dos fatores de deslocamento (shift factors) encontram-se apresentados na Tabela 18, calculados conforme as Equações (18) e (19), respectivamente. As curvas mestras ajustadas do módulo dinâmico são mostradas nas Figuras 72 (em escala log–log) e 73 (em escala semi-log), destacando-se a boa aderência entre os pontos experimentais e as funções ajustadas. Complementarmente, a Figura 74 apresenta as curvas mestras do ângulo de fase. Para garantir consistência na comparação, as frequências medidas foram convertidas para a temperatura de referência de 20 °C por meio da aplicação dos fatores de deslocamento.

Tabela 18: Coeficientes de ajuste do modelo sigmoideal utilizado para determinação do módulo dinâmico

Misturas	Coeficientes da função polinomial do shift-factor			Coeficientes do modelo sigmoideal(KPa)			
	a1	a2	a3	δ	α	β	γ
Faixa B	0,0009	-0,1762	3,1523	2,64	4,93	1,59	0,25
Gap Graded	0,0005	-0,1633	3,077	3,42	4,04	1,39	0,28

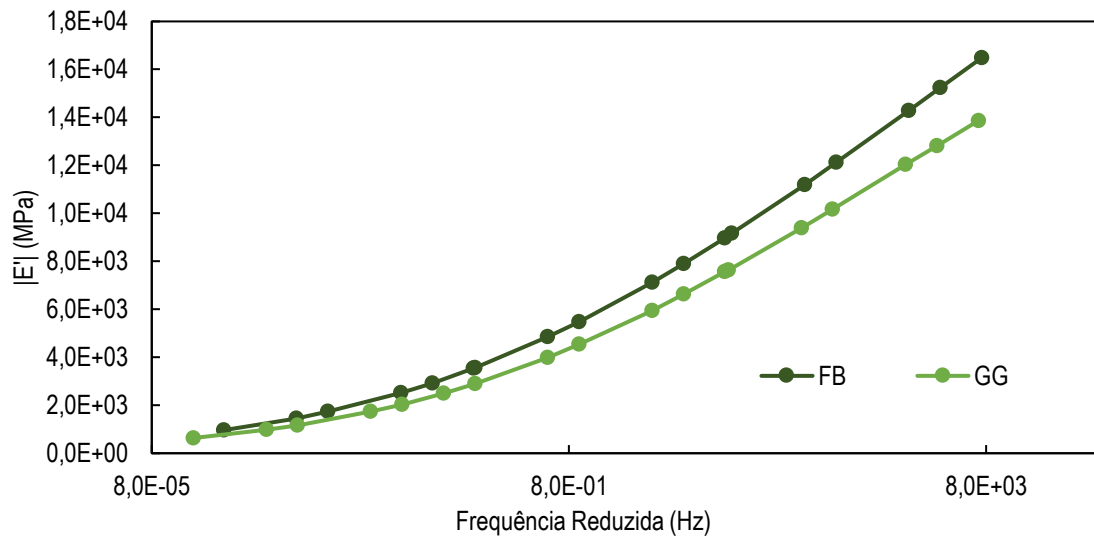
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 72: Curvas mestras das misturas das misturas asfálticas estudadas na temperatura de referência de 20°C, em escala log-log



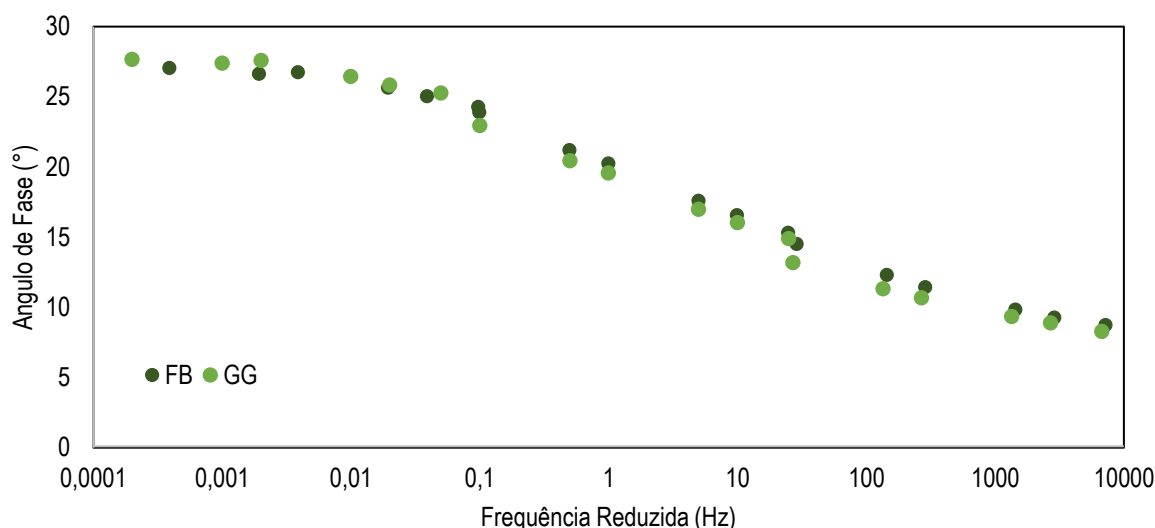
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 73: Curvas mestras das misturas asfálticas estudadas na temperatura de referência de 20°C, em escala semi-log



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 74: Curvas mestras de ângulo de fase das misturas asfálticas estudadas na temperatura de referência de 20°C



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

As curvas mestras de módulo dinâmico $|E^*|$ obtidas na temperatura de referência de 20 °C evidenciam o comportamento viscoelástico típico das misturas asfálticas com asfalto-borracha: observa-se aumento progressivo de $|E^*|$ com a elevação da frequência reduzida, indicando que o material se torna mais rígido quando submetido a carregamentos mais rápidos (ou, de forma equivalente pela superposição tempo–temperatura, em condições associadas a temperaturas mais baixas), enquanto em baixas frequências reduzidas a rigidez diminui, refletindo uma resposta mais suscetível à fluência e ao acúmulo de deformações sob solicitações lentas. Em termos comparativos, a mistura Faixa B (FB) apresenta $|E^*|$ ligeiramente superior ao da mistura gap-graded (GG) ao longo de praticamente todo o domínio de frequências reduzidas, tanto na representação log–log quanto na semi-log, o que indica uma estrutura global mais rígida para a graduação densa mesmo utilizando o mesmo ligante modificado com borracha.

Nota-se que a diferença entre as misturas é relativamente menor no extremo de baixas frequências (ordem de grandeza em torno de 10^3 MPa), mas se torna mais perceptível em altas frequências, onde a FB atinge valores mais elevados (na ordem de 10^4 MPa) em relação à GG. Esse resultado sugere que a organização granulométrica e o empacotamento interno exercem papel decisivo na rigidez do compósito: a graduação densa da Faixa B tende a promover maior intertravamento e participação do esqueleto mineral na resposta mecânica, elevando $|E^*|$, enquanto a gap-graded, por apresentar uma distribuição granulométrica descontínua e maior influência do mástique, tende a resultar em resposta relativamente mais deformável. Do ponto de vista do desempenho mecanicista, maior $|E^*|$ em baixas frequências é um indicativo favorável à resistência à deformação permanente, uma vez que o carregamento lento e repetido é uma condição representativa de tráfego pesado e temperaturas

elevadas; assim, os dados apontam uma tendência de melhor capacidade da Faixa B em restringir deformações acumuladas nesse regime. Por outro lado, a menor rigidez da GG pode ser interpretada como uma característica potencialmente benéfica para reduzir níveis de tensão e favorecer o desempenho frente a mecanismos associados ao trincamento, embora essa hipótese deva ser confirmada por parâmetros específicos de fadiga e dano.

A curva mestra do ângulo de fase reforça essa interpretação ao mostrar a redução de δ com o aumento da frequência reduzida, saindo de valores próximos de 27–28° em baixas frequências para cerca de 8–10° em altas frequências, o que indica transição de uma resposta mais dissipativa (maior componente viscosa) para uma resposta mais elástica e recuperável à medida que o carregamento se torna mais rápido. Além disso, as curvas de δ para FB e GG são muito próximas e, em grande parte, sobrepostas, sugerindo que as duas misturas compartilham natureza viscoelástica semelhante — coerente com o uso do mesmo asfalto-borracha, e que a principal diferença entre elas se manifesta sobretudo na magnitude de $|E^*|$, mais sensível à estrutura granular e ao empacotamento. Por fim, a boa aderência entre os pontos experimentais e as curvas ajustadas indica consistência na construção das curvas mestras e na determinação dos fatores de deslocamento, o que é essencial para etapas subsequentes de modelagem (como VECD), nas quais a caracterização viscoelástica constitui base para separar a resposta dependente do tempo/temperatura do processo de evolução do dano (Guedes, 2024).

Para a aplicação do modelo S-VECD, a parcela do módulo dinâmico associada ao módulo de armazenamento (E') foi convertida para o módulo de relaxação por meio de uma representação em série de Prony. Como etapa preliminar, os valores de E' de cada mistura foram descritos por uma função sigmoidal, essa abordagem visa aprimorar o ajuste da série de Prony para o módulo de relaxação, cujos parâmetros estimados são apresentados na Tabela 19.

Em seguida, os parâmetros da série de Prony tanto para o módulo de armazenamento (E') quanto para o módulo de relaxação foram determinados pelo método de colocação. Adotou-se uma expansão com 17 termos, considerando tempos de relaxação (ρ_i) distribuídos entre $2,0 \times 10^8$ e $2,0 \times 10^{-8}$ s, espaçados em intervalos de uma década. Os valores ajustados de ρ_i e E_i , bem como as taxas de crescimento do dano (α), são reportados na Tabela 20. O parâmetro α foi obtido a partir do coeficiente angular n da taxa de relaxação em escala log–log para cada mistura, utilizando a relação $\alpha = 1 + 1/n$. De acordo com Sahebzamani *et al.* (2022), misturas com maior rigidez tendem a apresentar α mais elevado.

Tabela 19: Coeficientes de ajuste do modelo sigmoidal utilizado para determinação do módulo de armazenamento

Misturas	Coeficientes do ajuste sigmoidal				
	max E'	δ	α	β	γ
Faixa B	34447031.52	3.69	3.85	-1.30	-0.28
Gap Graded	26684523.69	3.98	3.44	-1.20	-0.31

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Tabela 20: Tempos de relaxação (ρ_i) e módulos do elemento de Maxwell (E_i) para as séries de Prony

ρ_i	E_i	
	Faixa B	Gap Graded
2,00E+08	41751	36630
2,00E+07	18267	13741
2,00E+06	49970	38846
2,00E+05	92137	70033
2,00E+04	178065	135622
2,00E+03	333708	258438
2,00E+02	595736	474524
2,00E+01	990077	814422
2,00E+00	1507851	1276236
2,00E-01	2087291	1800301
2,00E-02	2624941	2277766
2,00E-03	3015699	2598515
2,00E-04	3195368	2703217
2,00E-05	3158337	2600645
2,00E-06	2946271	2347467
2,00E-07	2617950	2011513
2,00E-08	2342312	1729561
Fator de dano α	4.699	4.766

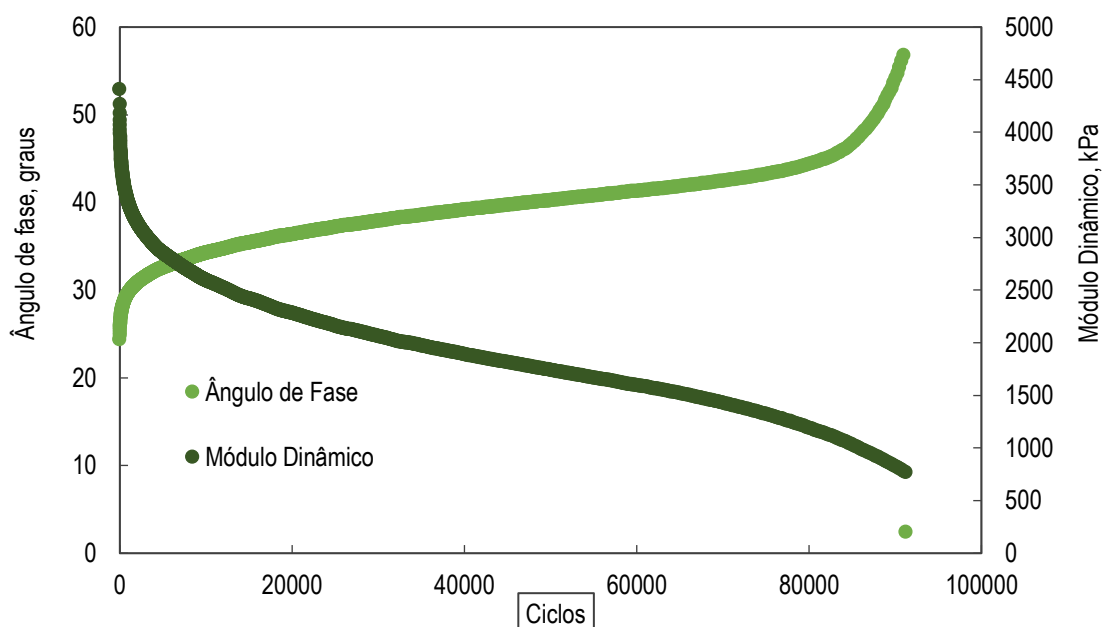
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

4.2.8. Fadiga a Tração Direta

Os dados do ensaio de fadiga à tração direta foram interpretados com base no modelo S-VECD, considerando diferentes amplitudes de deformação. Para cada nível de deformação previamente definido (cerca de 130, 155 e 180 μS para faixa B e 180, 230 e 280 μS para o Gap Graded), foi ensaiado um corpo de prova. Antes da aplicação do carregamento cíclico de fadiga, realizou-se em cada amostra o ensaio de módulo dinâmico do tipo *fingerprint*, com o objetivo de quantificar e corrigir diferenças iniciais de rigidez entre os corpos de prova, reduzindo a influência da variabilidade amostral na comparação dos resultados.

Na etapa de pós-processamento, foram construídas, para cada espécime, as curvas de evolução do módulo dinâmico ($|E^*|$) e do ângulo de fase (δ) em função do número de ciclos. Essas representações permitem localizar o instante de falha, identificado pela variação acentuada do ângulo de fase. Adotou-se como vida à fadiga (N_f) o ciclo correspondente ao valor máximo de δ , conforme ilustrado na Figura 75.

Figura 75: Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase versus número de ciclos de ensaio de fadiga



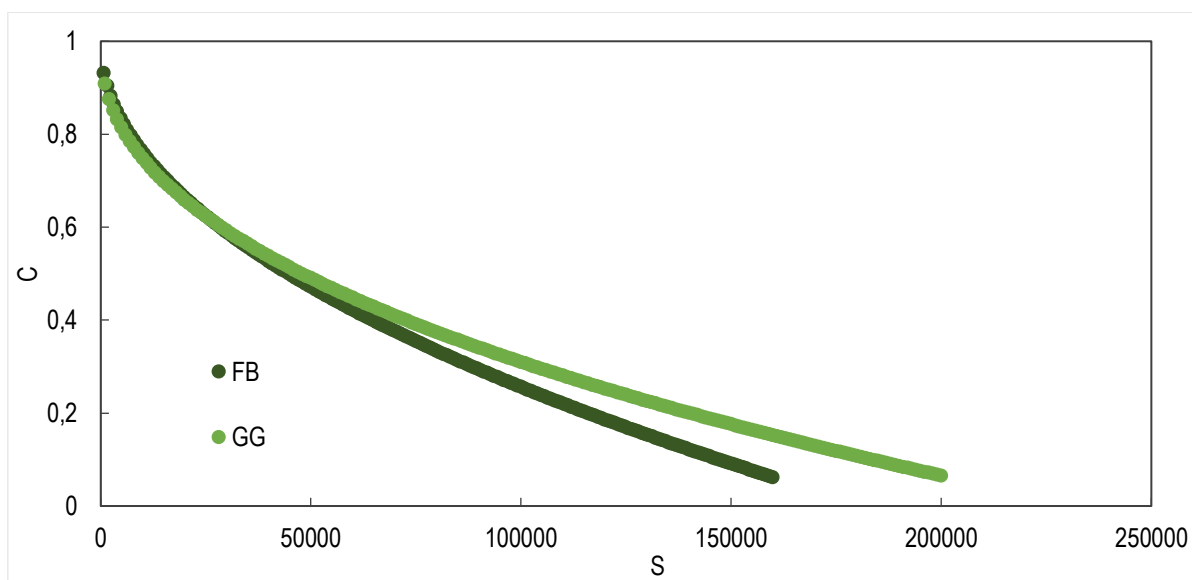
Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

A aplicação do modelo S-VECD requer a determinação de dois parâmetros centrais: a pseudorrigidez (C), interpretada como um indicador de integridade do material, e o dano (S), calculado segundo o procedimento apresentado na Seção 2.3.1. Uma vez estimados C e S , é possível construir as curvas que relacionam integridade e dano acumulado, isto é, as curvas C versus S . Essa relação é considerada uma característica intrínseca de cada mistura, pois expressa como o material degrada sua rigidez à medida que o dano se acumula.

Do ponto de vista conceitual, espera-se que, para uma mesma mistura asfáltica, as curvas C/S obtidas sob diferentes amplitudes de deformação se superponham, uma vez que representam a mesma “assinatura” de dano do material. Em outras palavras, embora fatores como amplitude de carregamento, forma de solicitação, frequência e temperatura afetem a resposta observada no ensaio e a vida à fadiga, a relação fundamental entre perda de integridade e dano interno tende a permanecer essencialmente a mesma quando o material é descrito no domínio do dano. Essa propriedade é particularmente relevante porque permite representar o comportamento à fadiga a partir de uma matriz experimental mais enxuta, mantendo a capacidade de comparação e de modelagem mecanicista.

Neste trabalho, as curvas características foram ajustadas por meio de uma função do tipo lei de potência, adotando-se a expressão $C = 1 - C11 \cdot S^{(C12)}$, em que C11 e C12 são constantes obtidas por regressão. O ajuste matemático da curva C/S, em conjunto com a própria curva característica de dano, fornece a base para a extração dos parâmetros fundamentais do modelo S-VECD e para a posterior previsão do desempenho à fadiga. A Figura 76 apresenta as curvas C versus S correspondentes às misturas avaliadas.

Figura 76: Curvas características de dano das misturas asfálticas estudadas (25°C temperatura de ensaio)



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Para uma análise mais aprofundada do desempenho contra fadiga das misturas de asfalto em estudo, é fundamental considerar também as envoltórias de ruptura e as simulações, levando em conta a estrutura da pavimentação, o tráfego e as condições climáticas. Entretanto, é possível realizar algumas interpretações preliminares apenas a partir das curvas características C versus S, comparando as discrepâncias entre as misturas ao longo do dano acumulado. Nessa abordagem, são conduzidas duas análises complementares: (i) a taxa de perda de integridade, que permite identificar quais misturas apresentam maior declínio de C para um mesmo nível de S (indicando comportamento menos favorável), e (ii) a integridade na ruptura, em que misturas que chegam ao ponto de falha com maior integridade (C mais elevado) tendem a apresentar pior desempenho à fadiga, pois rompem mantendo maior rigidez/integridade residual.

Com base nesse procedimento e observando o gráfico das curvas C/S a 25 °C, verifica-se inicialmente que ambas as misturas com asfalto-borracha apresentam o comportamento esperado de degradação progressiva: a pseudorrigidez C diminui de forma monotônica à medida que o dano acumulado S cresce. Ao comparar diretamente as duas curvas, nota-se que a Faixa B (FB) se posiciona,

na maior parte do domínio, abaixo da Gap-graded (GG). Isso significa que, para um mesmo valor de dano S, a FB já apresenta menor integridade (menor C), evidenciando uma perda de integridade mais acelerada. Portanto, segundo o primeiro critério (i), a FB mostra um declínio mais acentuado de C para o mesmo nível de dano acumulado, o que sugere um comportamento menos favorável no que se refere à resistência à fadiga quando analisada sob a ótica da taxa de degradação da integridade.

Além disso, observa-se que a GG se estende a valores mais elevados de S (isto é, avança mais à direita no gráfico) em comparação à FB, indicando que a mistura gap-graded suporta a evolução do dano por um intervalo maior antes de atingir a condição de ruptura adotada no ensaio. Esse aspecto é coerente com uma maior tolerância ao dano e, em uma leitura preliminar, pode apontar uma tendência positiva para desempenho à fadiga. Contudo, ao aplicar o segundo critério (ii) — integridade na ruptura, deve-se avaliar o valor de C no ponto final. No gráfico, a GG aparenta atingir a ruptura com C ligeiramente superior ao da FB. Seguindo o prisma adotado, isso indicaria que a GG rompe mantendo maior integridade residual, o que pode ser interpretado como pior desempenho à fadiga por esse critério específico, pois a falha ocorre com menor “consumo” de integridade até o colapso.

Assim, a leitura combinada das curvas C versus S sugere um quadro dual: por um lado, a GG apresenta menor taxa de perda de integridade (melhor no critério i) e maior extensão de dano acumulado até a falha; por outro, ela pode exibir maior integridade no ponto de ruptura (pior no critério ii). Já a FB tende a perder integridade mais rapidamente para o mesmo S, mas chega à ruptura com C menor. Dessa forma, embora as curvas características forneçam indícios importantes sobre o mecanismo de degradação e a sensibilidade ao dano, a conclusão mais consistente sobre o desempenho à fadiga em nível de pavimento deve, como indicado, ser complementada por envoltórias de ruptura e simulações mecanicistas, incorporando estrutura, tráfego e clima, pois é essa etapa que traduz as diferenças das curvas C/S em vida à fadiga prevista sob condições reais de solicitação.

Na sequência da interpretação das curvas características C versus S, que permitem comparar a taxa de perda de integridade e a integridade no ponto de ruptura, a avaliação do desempenho à fadiga foi complementada pela adoção de critérios de falha baseados (i) na energia pseudo-deformação liberada por ciclo e (ii) na redução da pseudorrigidez ao longo do ensaio. Essa etapa é importante porque fornece uma leitura objetiva do processo de acumulação de dano e viabiliza a construção de envoltórias de ruptura, que posteriormente podem ser utilizadas em simulações mecanicistas considerando estrutura de pavimento, tráfego e clima.

Como primeiro critério, utilizou-se a taxa média de variação da energia pseudo-deformação liberada por ciclo durante todo o ensaio, denominada GR, conforme proposto por Kim (2009). A partir desse parâmetro, foram obtidas as envoltórias de ruptura GR versus Nf, nas quais Nf representa o número de ciclos associado à falha do corpo de prova. As envoltórias foram ajustadas por um modelo do

tipo lei de potência, expresso pela Equação (41), usualmente linearizado em escala logarítmica para facilitar a regressão. Nessa abordagem, a existência de uma correlação consistente entre GR e N_f é coerente com o princípio de que, quanto mais rapidamente o dano se desenvolve, isto é, quanto maior a energia liberada em um menor número de ciclos, maior tende a ser a suscetibilidade do material à ruptura por fadiga (NOROUZI et al., 2017). Adicionalmente, o coeficiente de determinação (R^2) associado ao ajuste da envoltória é utilizado como um indicador do grau de uniformidade e consistência dos ensaios realizados.

Como segundo critério, adotou-se o procedimento baseado na redução da pseudorrigidez (C) ao longo do teste, resultando no parâmetro DR, conforme abordagem proposta por Kim (2009). Nesse caso, parte-se da premissa de que, para um mesmo material, existe uma relação característica entre a soma do termo $(1-C)$ e o número de ciclos até a falha, relação essa que tende a se manter essencialmente independente das condições de ensaio. Assim, o valor médio de redução da pseudorrigidez até a ruptura (DR) foi calculado dividindo-se a soma de $(1-C)$ pelo número de ciclos de falha, conforme a Equação (43). Esse critério acrescenta uma perspectiva complementar à análise por GR, pois está diretamente ligado ao ritmo de degradação da integridade do material durante o carregamento cíclico.

A partir do critério DR, Wang (2019) propôs ainda o parâmetro Sapp (Equação 44) como um indicador da capacidade de resistência ao dano por fadiga, incorporando simultaneamente efeitos associados à rigidez e à tenacidade do material dentro do arcabouço do VECD. Em termos interpretativos, valores mais elevados de Sapp indicam melhor desempenho à fadiga, sendo adotado como referência que $Sapp > 8$ representa uma condição adequada. Os valores de referência de Sapp podem ser associados a diferentes níveis de tráfego (em número de eixos padrão), conforme apresentado na Tabela 21.

Dessa forma, a Tabela 21 reúne: (i) os coeficientes C_{11} e C_{12} provenientes do ajuste da curva C versus S ; (ii) os parâmetros Y e Δ obtidos no ajuste das envoltórias de ruptura GR- N_f para cada mistura (Figura 77); (iii) os valores calculados do critério DR; e (iv) o indicador de capacidade de dano Sapp. Por fim, os valores de R^2 das envoltórias GR e os desvios-padrão associados ao critério DR fornecem evidências adicionais de repetibilidade e consistência dos resultados experimentais.

$$GR = Y \cdot N_f^\Delta \quad (41)$$

onde Y e Δ são coeficientes de ajuste.

$$N_f = \left(\frac{\delta}{Y \left(\frac{C_{12}}{p} \right) + 1} \right)^{\frac{1}{\Delta + 1 - \left(\frac{C_{12}}{p} \right)}} \quad (42)$$

$$DR = \frac{\sum(1-C)}{N_f} \quad (43)$$

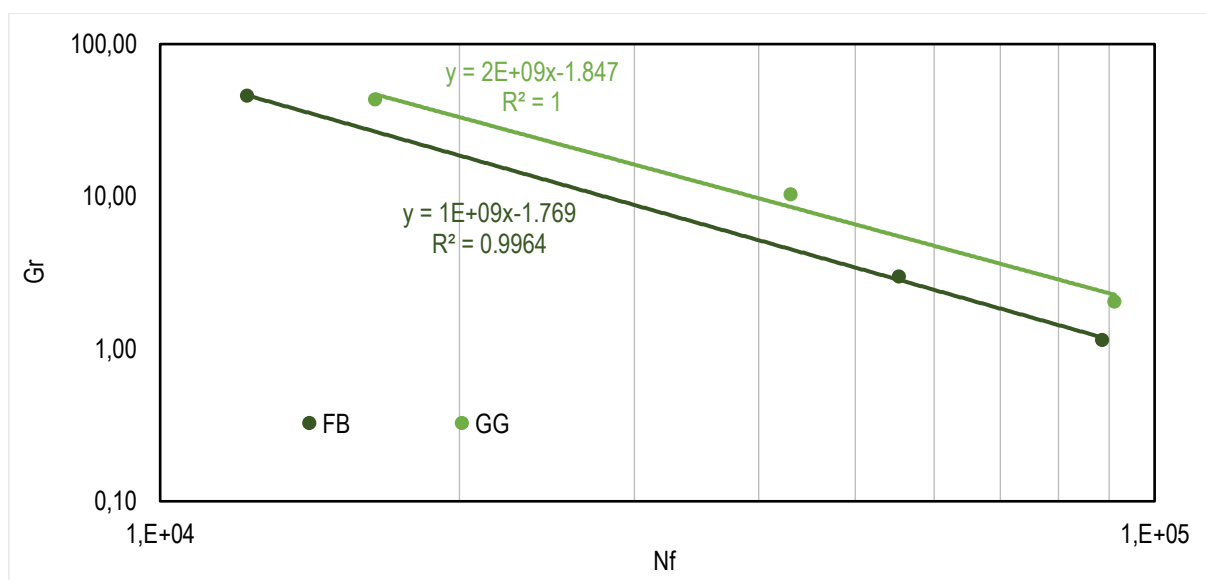
$$S_{app} = \frac{1}{100} \frac{a_T^{\frac{1}{\alpha+1}} \left(\frac{DR}{C_{11}}\right)^{\frac{1}{C_{12}}}}{\left(\frac{1E^*I}{10^6}\right)^{\frac{\alpha}{4}}} \quad (44)$$

Tabela 21: Valores limites recomendados para o parâmetro Sapp a diferentes níveis de tráfego e Parâmetros de ajuste da função potência C11 e C12, coeficientes de regressão do critério GR, critério DR e valor de Sapp

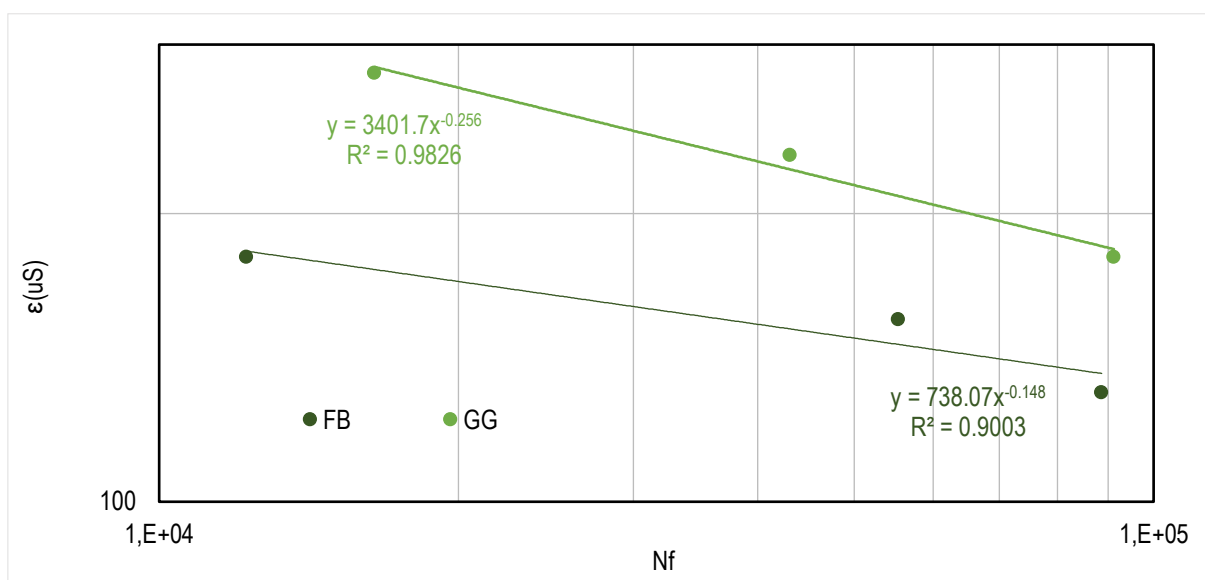
Tráfego (milhões de eixo-padrão)	Limites Sapp		Nível do tráfego				
Inferior a 10	S _{app} > 8		Padrão				
Entre 10 e 30	S _{app} > 24		Pesado				
Acima de 30	S _{app} > 30		Muito pesado				
Acima de 30 e baixa velocidade	S _{app} > 36		Extremamente pesado				
	Modelo C versus S		Critério de ruptura GR			Critério de ruptura DR	S _{app}
	C ₁₁	C ₁₂	Y	Δ	R ²	D ^R	
Faixa B	0.0025	0.4936	1.64E+09	-1,847	1	0,59	55
Gap Graded	0.0045	0.4372	1.34E+09	-1.769	0,99	0,64	95

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

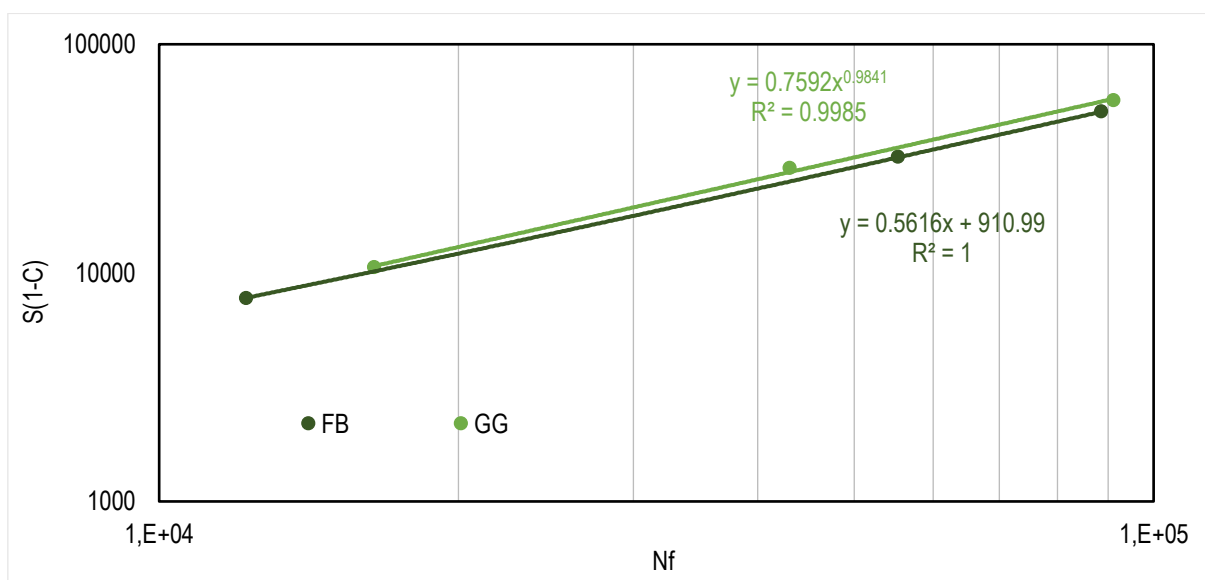
Figura 77: Critério de ruptura baseado no GR



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 78: Ciclos de fadiga calculados para deformações pré-estabelecidas

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 79: Soma(1-C) e Nf

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

No critério associado à taxa média de liberação de energia pseudo-deformação por ciclo (GR), as envoltórias GR/ N_f apresentaram excelente ajuste em escala logarítmica, com R^2 praticamente unitário, evidenciando uma relação muito consistente entre o parâmetro energético e a vida à fadiga. Esse nível de correlação é um indicativo de boa repetibilidade e é compatível com a aplicação desse tipo de envoltória para materiais asfálticos em contexto brasileiro, como já discutido na literatura (Possebon *et al.*, 2019; Boeira *et al.*, 2018). Observando as retas ajustadas, nota-se que ambas as misturas seguem a tendência esperada: quanto maior o N_f , menor o GR, o que é coerente com a ideia de que materiais que chegam à ruptura em mais ciclos dissipam energia de dano de forma mais lenta ao longo do

carregamento. Comparativamente, a curva da GG se posiciona em níveis de GR ligeiramente mais elevados para um mesmo Nf, o que, pela leitura direta do gráfico, sugere uma taxa energética um pouco mais intensa ao longo do ensaio; ao se analisar no sentido inverso, a FB tende a fornecer valores de Nf um pouco superiores, indicando uma vantagem da FB sob o prisma estrito do critério GR.

Entretanto, quando a avaliação é feita com base na resposta em deformação aplicada e na capacidade de suportar ciclos para deformações pré-estabelecidas, observa-se uma diferenciação mais clara. A relação ϵ/N_f apresenta inclinações distintas entre as misturas (Figura 78), com a GG posicionando-se de forma a admitir maior Nf para a mesma amplitude de deformação, isto é, para níveis típicos do ensaio (na ordem de centenas de μS), a envoltória da GG aponta uma tolerância superior ao carregamento cíclico. Ainda que o ajuste da FB nessa regressão seja mais disperso em comparação à GG, a tendência global permanece coerente: a GG mantém desempenho mais favorável quando o parâmetro de comparação é a vida à fadiga para uma deformação imposta.

Essa conclusão é reforçada pelo critério baseado na redução de pseudorrigidez, representado pela relação entre $Soma(1-C)$ e Nf (Figura 79), que, conforme esperado, deve assumir um comportamento aproximadamente linear (ou quase linear) em escala aritmética. No gráfico correspondente, ambos os ajustes apresentam altos R^2 , confirmando a consistência do procedimento. Como o parâmetro DR está ligado ao quociente $Soma(1-C)/N_f$, uma curva com maior razão global entre essas grandezas representa uma maior capacidade de acumular dano até a ruptura, ou seja, maior habilidade de dissipar energia ao longo dos ciclos antes da falha. Nesse sentido, a GG apresenta valores de $Soma(1-C)$ sistematicamente mais elevados para um mesmo Nf, apontando para melhor resistência ao dano por fadiga sob esse critério. Assim, embora o critério GR sugira diferenças mais sutis, os critérios baseados em $\epsilon-N_f$ e, principalmente, em DR, indicam de forma mais consistente uma superioridade da GG na capacidade de suportar carregamentos cíclicos e acumular dano antes da ruptura.

Por fim, como o indicador Sapp é derivado do critério DR e ainda incorpora efeitos de rigidez no âmbito do VECD, ele fornece uma métrica consolidada para classificar o desempenho à fadiga: valores maiores de Sapp correspondem a comportamento mais favorável, e a interpretação final deve ser feita em conjunto com os valores apresentados na Tabela 21 e com as faixas de tráfego associadas. Dessa forma, a leitura integrada dos resultados sugere que a GG tende a apresentar melhor desempenho à fadiga quando se considera a capacidade de acumular dano (DR) e a vida para deformações impostas (ϵ/N_f), mantendo, ao mesmo tempo, envoltórias com ajuste estatístico elevado; já a FB pode apresentar desempenho competitivo quando a comparação é feita estritamente pela envoltória energética GR/Nf.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros. As considerações finais reúnem, de forma organizada, os pontos discutidos ao longo do trabalho e os relacionam aos objetivos específicos estabelecidos. As conclusões consolidam os resultados e as interpretações obtidas, destacando os aspectos mais relevantes do estudo. Por fim, as sugestões para trabalhos futuros indicam possibilidades de continuidade e aprimoramento da pesquisa.

5.1. Consideração final

Na caracterização física e reológica dos ligantes com 5%, 10% e 15% de borracha, observou-se que o aumento do teor de borracha promove mudanças no ligante, dando maior resistência em altas temperaturas e maior recuperação elástica devido ao ganho na rigidez do material. Nos ensaios físicos convencionais, o AB10 apresentou penetração antes do RTFO de 30 dmm, estando dentro do intervalo especificado para asfalto-borracha (30–70 dmm), e penetração retida após RTFO de 74%, acima do valor mínimo exigido ($\geq 55\%$), atendendo às exigências normativas consideradas no trabalho. Além disso, o ponto de amolecimento do AB10 foi 56 °C (antes do RTFO) e 66 °C (após RTFO), valores compatíveis com as referências normativas apresentadas para asfaltos-borracha (AB8 e AB22), indicando aumento de consistência térmica com a modificação. Por fim, a recuperação elástica do AB10 foi 55% antes do RTFO e aumentou para 74,50% após o RTFO, atendendo às referências de especificação indicadas no trabalho e confirmando o ganho de resposta elástica conferido pela borracha.

Do ponto de vista reológico, os resultados do MSCR pós-RTFO mostraram aumento expressivo da recuperação elástica em relação ao ligante de referência; em 0,1 kPa, por exemplo, o AB10 alcançou recuperação de 74,19%, enquanto o AV apresentou 9,81%, indicando maior capacidade de recuperação após o carregamento e comportamento mais favorável ao desempenho em temperaturas elevadas. Assim, a seleção do AB10 como teor de trabalho foi sustentada pelo conjunto de evidências obtidas, pois apresentou comportamento físico-reológico consistente e compatível com os requisitos adotados no estudo. Complementarmente, a análise de PG no topo e na base após estocagem mostrou PG contínuo de 78,4 °C (topo) e 93,7 °C (base) para o AB10, evidenciando diferença reológica entre as porções da amostra

A estabilidade à estocagem foi inicialmente interpretada pelo critério tradicional do ponto de amolecimento (ΔPA topo–base), e os resultados indicaram que os três teores permaneceram abaixo do limite de 9 °C: AB5 com ΔPA médio de 7,0 °C, AB10 com 6,75 °C e AB15 com 0,5 °C, o que, por esse

critério, evidencia que no teor de 15% de borracha houve uma saturação do ligante e todos os teores sendo aceitáveis com relação à variação do ponto de amolecimento.

Contudo, a análise reológica comparativa entre topo e base mostrou-se decisiva para compreender a separação de fases de forma mais completa. Os resultados de PG contínuo topo-base evidenciaram que o AB15 apresentou comportamento praticamente homogêneo, enquanto o AB10, apesar de “aceitável” pelo ΔPA , apresentou diferença reológica muito elevada entre topo e base (PG contínuo de 78,4 °C no topo e 93,7 °C na base, com mudança de classe de 76 para 88), indicando segregação com impacto direto no desempenho em alta temperatura. As curvas-mestras de $|G^*|$ e δ reforçaram esse diagnóstico ao indicarem separação consistente entre topo e base, sobretudo para AB5 e AB10, evidenciando que a homogeneidade do ligante não pode ser verificada apenas por um indicador físico global.

Na avaliação do desempenho à fadiga por tração direta e interpretação pelo S-VECD, a comparação entre as misturas indicou melhor resposta da Gap-Graded no conjunto do modelo. As curvas C versus S mostraram a Faixa B posicionando-se abaixo da Gap-Graded em grande parte do domínio, o que representa perda de integridade mais rápida para um mesmo nível de dano, e a Gap-Graded alcançou níveis mais elevados de dano antes da condição de ruptura adotada.

Esse comportamento também foi refletido nos parâmetros-resumo, com Sapp de 55 para a Faixa B e 95 para a Gap-Graded, indicando maior capacidade de suportar dano por fadiga na mistura descontínua dentro do critério aplicado. Na análise pela envoltória GR/Nf, observa-se que os dois parâmetros precisam ser lidos em conjunto: GR representa a rapidez com que o dano se desenvolve e Nf representa a vida à fadiga associada ao critério adotado. Nos resultados do trabalho, a Gap-Graded apresentou valores de GR mais favoráveis (menor taxa de evolução do dano) e um comportamento mais consistente da relação GR–Nf, indicando que, para um mesmo nível de solicitação, o dano tende a se desenvolver de forma menos acelerada. Já o Nf pode apresentar variações pontuais entre as misturas dependendo do critério e do nível de carregamento considerado, mas a leitura conjunta GR/Nf reforça a tendência de melhor comportamento à fadiga para a mistura Gap-Graded.

Quanto à deformação permanente, os resultados confirmaram que FN e SSR podem conduzir a interpretações distintas, especialmente ao comparar estruturas granulométricas diferentes. No Flow Number, a Faixa B apresentou média de 1308 ciclos, enquanto a Gap-Graded apresentou 217 ciclos, evidenciando melhor resposta da mistura densa sob o protocolo do ensaio. Ao mesmo tempo, os resultados indicam que o FN foi bastante sensível às condições impostas (tensão elevada e critério de parada), além de ser influenciado pela volumetria e pela natureza da estrutura interna, o que exige cautela na interpretação isolada e reforça a necessidade de comparar com outros métodos.

No SSR, por sua vez, a Gap-Graded apresentou menores deformações no cenário de maior severidade: na condição TH, a deformação viscoplástica final foi $4,18 \times 10^{-2}$ para Gap-Graded e $4,85 \times 10^{-2}$ para Faixa B. Além do valor final, os parâmetros do Shift Model mostraram diferenças relevantes na forma como as misturas acumulam deformação ao longo do carregamento: apesar de maior deformação inicial na Gap-Graded, os coeficientes associados à sensibilidade ao tempo efetivo de carregamento foram menores (p_1 e p_2), sugerindo menor sensibilidade ao acúmulo progressivo sob o protocolo do SSR. Em síntese, no conjunto da análise, o FN destacou melhor desempenho da Faixa B no seu protocolo específico, enquanto o SSR favoreceu a Gap-Graded ao representar o acúmulo de deformação sob múltiplos níveis de tensão e controle térmico, reforçando a importância de empregar mais de um critério para avaliar deformação permanente em misturas com estruturas distintas.

5.2. Conclusão

A escolha do ligante AB10 como ligante de trabalho foi sustentada pelo conjunto de resultados de caracterização física e reológica. No teor de 10% de borracha, o ligante apresentou comportamento consistente, com propriedades físicas dentro dos limites de especificação adotados e resposta reológica compatível com maior desempenho em temperaturas elevadas, incluindo recuperação elástica e resistência ao escoamento. Em comparação aos teores 5% e 15%, o AB10 representou um ponto de equilíbrio: mostrou ganho efetivo de desempenho sem exigir um teor mais alto que pode elevar excessivamente a rigidez e aumentar a complexidade operacional do material. Dessa forma, o AB10 se mostrou tecnicamente adequado para representar a condição de asfalto-borracha utilizada ao longo do programa experimental.

A avaliação da separação de fases demonstrou que a verificação da estabilidade à estocagem não deve ficar restrita ao protocolo tradicional baseado apenas em parâmetros físicos/empíricos (por exemplo, diferença de ponto de amolecimento). A análise reológica no topo e na base da amostra foi determinante para identificar e quantificar a segregação, pois evidencia diferenças de rigidez e de resposta elástica que podem não ser observadas com a mesma sensibilidade por um indicador físico. Assim, a reologia complementa e fortalece o diagnóstico de estabilidade, fornecendo uma leitura mais direta da homogeneidade do ligante e do impacto potencial da separação de fases na aplicação. Nesse sentido, os resultados indicam a necessidade de atualização da norma do DNIT para asfalto-borracha (DNIT 111/2009 - EM), uma vez que os critérios vigentes não incorporam, de forma suficiente, uma abordagem reológica topo-base capaz de caracterizar melhor a estabilidade do ligante modificado.

Quanto à deformação permanente, os resultados indicam que o Flow Number (FN), embora adotado pelo DNIT como parâmetro de avaliação, fornece essencialmente um valor associado à transição de comportamento sob um protocolo específico, sendo sensível às condições de ensaio e à

estrutura granulométrica (diferenças entre mistura densa e descontínua). Dessa forma, o FN pode variar fortemente entre misturas com arranjos internos distintos, sem necessariamente representar de modo completo o acúmulo progressivo de deformação permanente. Em contraste, o Stress Sweep Rutting (SSR) apresentou maior capacidade de interpretação por considerar a evolução da deformação ao longo do carregamento e por fornecer parâmetros que permitem comparar misturas com maior consistência e avançar para análises com potencial de previsão de afundamento de trilha de roda (ATR). Assim, para a finalidade de caracterizar deformação permanente com maior representatividade e capacidade de diagnóstico, o SSR se mostrou mais eficiente do que o FN no contexto desta pesquisa.

5.3. Sugestões para trabalhos futuros

Durante a concepção deste trabalho, foram identificadas diversas ideias para complementar e aprofundar a investigação, considerando os principais achados experimentais (SSR/FN, fadiga por VECD e influência clima/tráfego) e direções consolidadas em produções recentes (RSI/FlexMAT/FlexPAVE):

a) Aprofundar o estudo à estabilidade à estocagem com base reológica, adotando rotinas de avaliação topo e base após condicionamento em diferentes tempos e temperaturas de armazenamento, e incluindo indicadores reológicos complementares (por exemplo, MSCR e varreduras em DSR em diferentes temperaturas), para quantificar com maior sensibilidade a separação de fases e seus impactos funcionais.

b) Investigar a influência do processo de modificação (temperatura, tempo de mistura, taxa de cisalhamento e sequência de adição) sobre a homogeneidade do ligante e a separação de fases, buscando condições de produção que minimizem a segregação sem elevar excessivamente a rigidez do material.

c) Comparar diferentes métodos de verificação de separação de fases, confrontando o critério tradicional baseado em ponto de amolecimento com métricas reológicas (topo/base), para propor um procedimento integrado mais representativo para ligantes asfalto-borracha.

d) Empregar a simulação do comportamento do pavimento em condições climáticas e de tráfego realistas, utilizando ferramentas compatíveis com modelos mecanicistas (p.ex., FlexPAVE/FlexMAT), de modo a integrar (i) modelos calibrados em ensaios de mistura e (ii) resposta estrutural sob variação térmica e carregamento repetido, permitindo comparar indicadores previstos (fadiga e deformação) com níveis de dano observáveis em campo.

e) Ampliar a calibração do SSR (Shift Model) e a análise por índice (RSI), testando faixas adicionais de temperatura e níveis de tensão (e, quando aplicável, condições de confinamento), para avaliar estabilidade paramétrica e reduzir incertezas quando as diferenças entre misturas forem discretas

ao final do histórico multinível, reforçando a utilidade do SSR como ferramenta de diagnóstico mecanicista.

f) Refinar a representatividade climática brasileira nas simulações, substituindo/acomodando a correlação adotada por séries meteorológicas nacionais e conduzindo análises de sensibilidade para tráfego e estrutura, uma vez que a severidade prevista (p.ex., por RSI) é dependente do cenário de simulação e o estudo evidenciou maior criticidade no semiárido em comparação ao equatorial úmido.

CAPÍTULO 6

6. REFERÊNCIAS

ABDULLAH, Z. T. **Remanufactured waste tire by-product valorization: Quantitative–qualitative sustainability-based assessment.** Results in Engineering, v. 22, p. 102229, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102229>

ADNAN, AM, & WANG, J. **Enhancement of rheological performance and compatibility of tire rubber-modified asphalt binder with the addition of graphene.** Construction and Building Materials, v. 402, p. 133038, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133038>

AGUIAR, I. E. S., REZENDE, G. S., ARAÚJO, M. L. M., LIMA, G. G., MARINHO, C., SILVA, R. O. **Revisão sistemática: avaliação do descarte de pneus e sua reciclagem nas indústrias.** RevistaFT: Revista Científica de Alto Impacto, [S. l.], v. 27, n. 123, jun. 2023. Disponível em: <https://revistaft.com.br/revisao-sistemica-avaliacao-do-descarte-de-pneus-e-sua-reciclagem-nas-industrias/>

AL-RUBAIE, Ali H.; JONI, Hasan H. **Assessment the performance of asphalt mixtures modified with waste tire rubber at high temperatures.** Journal of Physics: Conference Series, v. 1895, n. 1, art. 012026, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012026>

AL-SOUDANY, K. Y. H.; MOHAMMED, H. H.; HUSSEIN, L. Y.; QASIM, Z. I. **Experimental Study of the Effect of Crumb Rubber on Properties of Asphalt Mix by Wet Process.** E3S Web of Conferences, v. 427, art. 03034, 2023. (ICGEE 2023). Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342703034>

ALFAYEZ, S. A., SULEIMAN, A. R., & NEHDI, M. L. **Recycling tire rubber in asphalt pavements: State of the art.** Sustainability, v. 12, n. 21, p. 9076, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12219076>

ALMEIDA, F. J. P. **Modelagem computacional de misturas asfálticas com a utilização do método dos elementos finitos, da teoria da viscoelasticidade linear e da mecânica do dano contínuo.** Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 141 f., 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/40405>

ALSHEYAB, M. A. T.; KHEDAYWI, T; OGILIAT, O. **Effect of Waste Tire Rubber on Properties of Asphalt Cement and Asphalt Concrete Mixtures: State of the Art.** International Journal of Pavement Research and Technology, v. 18, p. 516–527, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42947-023-00361-4>

AASHTO. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO MEPDG-2:2015 – Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice**. Washington, DC: AASHTO, 212 p., 2015. Disponível em: https://store.transportation.org/Item/CollectionDetail?ID=279&srsId=AfmBOopSvNxeB6kOM5XKts4ae19C7YnanVPeXhp7f-1WotZyvM9r7LNq&utm_source

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 897, de 18 de novembro de 2022. Dispõe sobre as especificações dos asfaltos e dos aditivos asfálticos de reciclagem para misturas a quente, e suas regras de comercialização em todo o território nacional. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-897-2022>

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15235:2009: Materiais asfálticos — Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional (RTFOT)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Disponível em: : <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/24487/abnt-nbr15235-materiais-asfalticos-determinacao-do-efeito-do-calor-e-do-ar-em-uma-pelicula-delgada-rotacional>

ANIP. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **Indústria nacional supera meta e acumula saldo positivo de 127 mil toneladas de pneus destinados**. São Paulo: ANIP, 5 jun. 2024. Disponível em: <https://www.anip.org.br/releases/industria-nacional-supera-meta-e-acumula-saldo-positivo-de-127-mil-toneladas-de-pneus-destinados/>

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D4402/D4402M-15: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1520/D4402_D4402M-15

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D5/D5M-20: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1520/D0005_D0005M-20

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D36/D36M-14(2020): Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1520/D0036_D0036M-14R20

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D6373-23: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D6373-23>

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D7405-20: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D7405-20>

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D7405-24: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D7405-24>

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D7369-20: Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Asphalt Mixtures by Indirect Tension Test.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

AASHTO. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 400-23: Standard method of test for determining the damage characteristic curve and failure criterion using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) cyclic fatigue test.** Washington, DC: AASHTO, 2023. Disponível em: https://store accuristech.com/standards/aashto-t-400-23?product_id=2574544

AASHTO. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS **AASHTO TP 107-18: Standard method of test for determining the damage characteristic curve and failure criterion using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) cyclic fatigue test.** Washington, DC: AASHTO, 2018.

AASHTO. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 320:2022: Specification for Performance-Graded Asphalt Binder.** Washington, DC: AASHTO, 2022. Disponível em: https://www.intertekinform.com/en-gb/standards/aashto-m-320-2022-1194_saig_aashto_aashto_3210618/

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7369-20: Standard test method for determining the resilient modulus of asphalt mixtures by indirect tension test.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. Disponível em: <https://www.astm.org/d7369-20.html>

BABADOPOULOS, L. F. A. L. **A contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)

— Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11164/1/2014_dis_lfalbabadopulos.pdf

BAN, I; BARIŠIĆ, I; CUCULIĆ, M; ZVONARIĆ, M. **Performance Evaluation of Waste Rubber-Modified Asphalt Mixtures: A Comparative Study of Asphalt Concrete and Stone Mastic Asphalt Gradings.** *Infrastructures*, v. 10, n. 5, art. 107, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/infrastructures10050107>

BARRETO, J., FERNANDES, E. M., MOREIRA, R., PRATES, M., WAY, G., & SOUSA, J. B. **Sustainable Mixes with Reacted and Activated Rubber: Application on a Highly Cracked Pavement.** *International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements*. Cham: Springer Nature Switzerland, p. 455-467, 2024. Disponível em: <https://www.springerprofessional.de/en/sustainable-mixes-with-reacted-and-activated-rubber-application-/27370988>

BARROS, L. M; DO NASCIMENTO, L. A. H; ARAGÃO, F. T. S. **Effects of binder and aggregate properties on the permanent deformation of asphalt mixtures by means of uniaxial and triaxial tests.** *Construction and Building Materials*, v. 332, art. 127346, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127346>

BASTOS, J. B. S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico.** Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/23173/1/2016_tese_jbsbastos.pdf

BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G; RONDÓN-QUINTANA, H. A. **Assessment of asphalt binder content, temperature and loading rate in indirect tensile strength and resilient modulus tests of a hot-mix asphalt – Comparison with Marshall design method.** *Construction and Building Materials*, v. 426, p. 136158, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136158>.

BEJA, I. A. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo Large Stone Asphalt Mixture (LSAM).** 2020. 153 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2020. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/39995/1/2020_IgorAmorimBeja.pdf

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P; SOARES, J. B. **Ligantes asfálticos. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, p. 35-216, 2022. Disponível em: <https://abeda.org.br/wp-content/uploads/2023/06/pa-captulo-04.pdf>

BERTOLLO, S. A. M; FERNANDES J. J. L; VILLAVERDE, R. B; MIGOTTO F. D. **Pavimentação asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados.** Revista Limpeza Pública, São Paulo, n. 54, p. 23-30, 2000. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/050cdcf2-3d97-4b9d-b58a-958e889ac9c3/prod_000810_sysno_1093688.pdf.

BOEIRA, F. D; PINHEIRO, G. S; SPECHT, L. P; DRUZIAN, E. L; JUST, M. L; BABADOPULOS, L. F. A. L; NASCIMENTO, L. A. H; PEREIRA, D. **Projeto e implementação de ensaio de fadiga por tração-compressão direta (uniaxial) para avaliação de dano em misturas asfálticas.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, n. 3, e-12148, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0482>.

BONAQUIST, R. F. **Evaluation of Flow Number (FN) as a Discriminating HMA Mixture Property.** Madison, WI: Wisconsin Department of Transportation / Wisconsin Highway Research Program, 2012.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009. **Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada.** Brasília, 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/>

BRUSTOLON, P. A; PAIVA, V. G. **Uso da borracha de pneus na pavimentação: como uma alternativa viável nas ruas de Porto Velho/RO.** [S. l.]: Zenodo, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6525754>.

CAO, W; NOROUZI, A; KIM, Y. R. **Application of viscoelastic continuum damage approach to predict fatigue performance of Binzhou perpetual pavements.** Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), v. 3, n. 2, p. 104–115, abr. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.03.002>

CASTAÑEDA-ROBLES, I. E., OLGUÍN-COCA, F. J., & GAONA-TIBURCIO, C. **Sustainable Technologies Applied to Asphalt Paving by Reusing Polymeric Waste. Sustainable Spaces in Arid and Semiarid Zones of Mexico.** Cham: Springer International Publishing, 2024. p. 111-126. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-53418-8_7

CHAVEZ, F., MARCOBAL, J., & GALLEGOS, J. **Laboratory evaluation of the mechanical properties of asphalt mixtures with rubber incorporated by the wet, dry, and semi-wet process.** Construction and

Building Materials, v. 205, p. 164-174, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.159>

CHRISTENSEN, R. M. **Theory of Viscoelasticity: An Introduction**. 2. ed. New York: Academic Press, 1982.

COFONE, L., SABATO, M., DI PAOLO, C., DI GIOVANNI, S., DONATO, MA, & PAGLIONE, L. **Urban, architectural, and socioeconomic factors contributing to the concentration of potential arbovirus vectors and arbovirolosis in urban environments from a one health perspective: A systematic review**. Sustainability, v. 17, n. 9, p. 4077, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17094077>

COFFEY, G. P; OZBULUT, O. E; SEITLLARI, A; BOZ, I; HABBOUCHE, J; DIEFENDERFER, S. D. **Simple and practical tests for rutting evaluation of asphalt mixtures in the balanced mix design process**. Charlottesville: Virginia Transportation Research Council, 2023. Disponível em: <https://vtrc.virginia.gov/media/vtrc/vtrc-pdf/vtrc-pdf/23-R11.pdf>

DI BENEDETTO, H; CORTÉ, J. F. **Matériaux routiers bitumineux 2: constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges**. Paris: Hermès Science/Lavoisier, 2005.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). **DNIT 439/2022-ME: Pavimentação – Ligante asfáltico – Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep) – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_439_2022_me.pdf

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: DNER, 1995. Disponível em: <https://unidades.tc.df.gov.br/trilhas/wp-content/uploads/sites/5/2017/09/DNER-ME-43-95-Estabilidade-e-Flu%C3%Aancia.pdf>

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 138/94: Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 1994. Disponível em: https://unidades.tc.df.gov.br/trilhas/wp-content/uploads/sites/5/2017/09/dnit031_2006_es-execu%C3%A7%C3%A3o-dos-pav-flex.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). **DNIT 178/2018-PRO: Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento.** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/DNIT_178_2018_PRO1.pdf

DNIT. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 111/2009-EM: Pavimentação flexível – Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de material.** Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR)/DNIT, 2009. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dnit_111_2009_em-1.pdf.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 031/2024-ES: Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço (com incorporação da Errata 1).** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/errata_1_dnit_031_2024_es.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). **DNIT 180/2018-ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_180_2018_me-1.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 449/2024-PRO: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Parâmetros volumétricos para dosagem de misturas asfálticas – Procedimento (com incorporação da Errata 1).** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/DNIT_449_PRO_Com_incorporacao_da_Errata_1.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 447/2024-ME: Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall – Método de ensaio (com incorporação da Errata 1).** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/errata_1_dnit_447_2024_me.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 112/2009–ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de serviço.** Brasília, DF: DNIT, 2009. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_112_2009_es.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 031/2024–ES: Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço.** Brasília, DF: DNIT, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_031_2024_es_com_incorporacao_da_errata-1.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 111/2009-EM: Pavimentação flexível – Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de material.** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2009. Disponível em: (PDF no portal Gov.br/DNIT). Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dnit_111_2009_em-1.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 412/2025-ME: Agregados – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit-412_2025_me.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 413/2021-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_413_2021_me.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). **DNIT 416/2019-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_416_2019_me-1.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 411/2021-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_411_2021_me-1.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 424/2020-ME: Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_411_2021_me-1.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 451/2024-ME: Agregados – Determinação do desgaste por abrasão e impacto no equipamento “Los Angeles” – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_451_2024_me.pdf

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 452/2024-ME: Agregado graúdo – Adesividade ao ligante asfáltico – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_452_2024_me.pdf

DO, T. C; NGUYEN, T. H; NGUYEN, V. L. **Experimental study on the resistance of asphalt mixtures to permanent deformation and its relation to mechanical behavior of pavement structures.** Case Studies in Construction Materials, v. 22, e04248, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04248>

DUARTE, G. M; FAXINA, A. L. **Low-Temperature and Fatigue Properties of Asphalt Binders Modified with Crumb Rubber from Discarded Tires and Recycled Low-Density Polyethylene.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 34, n. 9, art. 04022209, 2022. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004365](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004365)

DWIVEDI, C., MANJARE, S., & RAJAN, S. K. **Recycling of waste tire by pyrolysis to recover carbon black: Alternative & environment-friendly reinforcing filler for natural rubber compounds.** Composites Part B: Engineering, v. 200, p. 108346, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108346>

FANG, L., DONG, X., WANG, H., & GONG, M. **Economic analysis of compressed gaseous hydrogen, liquid hydrogen, and cryo-compressed hydrogen storage methods for large-scale storage and transportation.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 162, p. 150725, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150725>

FAXINA, A. L. **Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante tipo asfalto-borracha.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-13052016-155321/pt-br.php>

FHWA. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **The use of recycled tire rubber to modify asphalt binder and mixtures.** Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 2014. (Technical Brief, FHWA-HIF-14-015). Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/hif14015.pdf>

FHWA. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Crumb Rubber Modifiers (CRM) in Asphalt Pavements: Summary of Practices in Arizona, California, and Florida.** Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 1995. (FHWA-SA-95-056). Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/013380.pdf>

FHWA. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure.** McLean, VA: Federal Highway Administration, 2011. (Technical Brief). FHWA-HIF-11-038. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/pubs/hif11038/hif11038.pdf>

FERRY, J. D. **Viscoelastic properties of polymers.** 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1980.

FRANCKEN, L. Testing and appraisal of polymer modified road bitumens. In: FRANCKEN, L. (ed.). Bituminous binders and mixes. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 1998. cap. 10. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/mono/10.1201/9781482271973-10/testing-appraisal-polymer-modified-road-bitumens-francken>

GASPAR, M. S.; NOGUEIRA, B. G.; VASCONCELOS, K. L.; LEITE, Leni F. M.; BERNUCCI, L. L. B. **Effect of different creep and recovery times on the MSCR test for highly modified asphalt binder.** Journal of Testing and Evaluation, v. 49, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/JTE20180584>

GIOVANI, A. M., SANDRA, O., FRANCISCO, G., & PEDRO, C.F. **Sustainable Practices in Asphalt Pavements and their Possible Applications in the Brazilian Market.** International journal of development research, v. 11, n. 02, p. 44850-44855, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.37118/ijdr.21245.02.2021>

GUABIROBA, J. O. C; REZENDE, L. R; BARROSO, L. X; SILVA, J. P. S. **Estudo da Fadiga e da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Produzidas em Goiás**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 28, n. 1, e13232, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620230001.1332>

GUEDES, L. R. **Estudo de misturas asfálticas modificadas por polímeros utilizando o modelo S-VECD**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Campina Grande, 2024. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/36732>

GUIMARÃES, D. M. D.; MOTTA, L. M. G; SILVA, B. A; FRITZEN, M. A; CASTRO, C. E. N. **A influência da composição granulométrica segundo as metodologias Bailey, FAD e Marshall no desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 27, n. 3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0027>

HASAN, M. A; HASAN, M. M; BAIRGI, B. K; MANNAN, U. A; TAREFDER, R. A. **Utilizing Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model to characterize the fatigue behavior of Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) modified binders**. Construction and Building Materials, v. 200, p. 159–169, 10 mar. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818330290>

HEITZMAN, M. **Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier**. Transportation Research Record, Washington, DC: Transportation Research Board, n. 1339, p. 1-8, 1992. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1339/1339-001.pdf>.

HOU, T. **Fatigue Performance Prediction of North Carolina Mixtures Using Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model**. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) — North Carolina State University, Raleigh, 2009. Disponível em: <https://repository.lib.ncsu.edu/server/api/core/bitstreams/90e5e039-1859-43f6-b687-8f43c8ea96c7/content>

HUANG, W; TANG, N. **Characterizing SBS modified asphalt with sulfur using multiple stress creep recovery test**. Construction and Building Materials, v. 93, p. 514–521, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.041>

ILDEFONSO, J. S; REIS, J. H. C; NETO, E. A. S; ANTUNES, V. E; SALATINI, P. C; GARCIA, C. **Influência da quantidade de agregados finos nas propriedades volumétricas e mecânicas de misturas asfálticas densas**. Brazilian Journal of Development, v. 11, n. 1, e76452, p. 1–19, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv11n1-015>

IBAMA. INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de Pneumáticos 2025: Resolução CONAMA nº 416/2009 (ano-base 2024)**. Brasília, DF: Ibama, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/arquivos/relatoriopneumaticos/20251201_Relatorio_Pneumatico_2025_2.pdf.

IBAMA. INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de Pneumáticos 2022: Resolução CONAMA nº 416/2009**. Brasília, DF: Ibama, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/arquivos/relatoriopneumaticos/2023-05-26_relatorio_pneumatico_2022.pdf

JAMIESON, S., WHITE, G., & VERSTRATEN, L. **Principles for incorporating recycled materials into airport pavement construction for more sustainable airport pavements**. Sustainability, v. 16, n. 17, p. 7586, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16177586>

JIN, J., XIAO, M., LIU, P., LIU, S., MA, K., LI, H., & SUN, Y. **Organic expansion vermiculite for synergistic enhancement of CR asphalt: microstructural mechanisms, rheological performance improvement, and noise reduction**. Materials and Structures, v. 58, n. 10, p. 353, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02890-9>

JIN, Y., LIU, F., & YU, W. **Shear Characteristics and Asymmetric Hysteresis Loop Model of Residual Soil Under Bidirectional Cyclic Loading Conditions**. International Journal of Civil Engineering, p. 1-17, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40999-025-01086-0>

JIN, T; FENG, Y; LI, M; LIU, L; YUAN, J; SUN, L. **Laboratory short-term aging of crumb rubber modified asphalt: RTFOT temperature optimization and performance investigation**. Journal of Cleaner Production, v. 434, art. 140327, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140327>

KELM, T. A., THIVES, L. P., TRICHÊS, G., DOS SANTOS, M. B., & ROHDE, L. **Soluções sustentáveis para pavimentação: uma revisão sistemática da utilização de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) em misturas asfálticas com enfoque na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**. Caderno Pedagógico, v. 22, n. 6, p. e15815-e15815, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n6-243>

KHANGHAHI, S. H; TORTUM, A; ZAKAVI, S. J. **Experimental evaluation of the air-voids content and NMAS on indirect tensile strength and ultrasonic test of HMA**. In: PACE 2021 – Atatürk University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Erzurum, Turkey, 20–23. Erzurum: Atatürk University, 2021. Disponível em: https://www.acapublishing.com/dosyalar/baski/PACE_2021_224.pdf

KIM, J. S. A **Micromechanical Model for Viscoelastic and Viscoplastic Behavior of Asphalt Concrete**. Dissertation (PhD) – Texas A&M University, College Station, 2009. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2007\)7:2\(131\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:2(131))

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V. C. **Asfalto-borracha: revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas**. Brasília, DF: Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), 2017. (Relatório CCR-ND-AB-RF-DEZ/2017). Disponível em: <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i2.2692>

KOMBA, J. J.; MAINA, J. W.; HORAK, E; STEYN, W. J; O'CONNELL, Johan. Distribution of air voids in compacted Hot-Mix Asphalt samples – laboratory vs field. In: CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS FOR SOUTHERN AFRICA (CAPSA), 12., 2019, Sun City. Anais [...]. Sun City: CAPSA, 2019. Disponível em: <https://researchspace.csir.co.za/bitstreams/678560b8-ae9e-4710-a420-d59b39b141cd/download>

LABBAFI, F., ALAVI, MZ, & SAADAT, F. **Comparative Analysis of Rubberized Asphalt and Traditional Asphalt: Performance, Economic, and Environmental Impacts in Life Cycle**. Infrastructures, v. 10, n. 2, p. 34, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/infrastructures10020034>

LEANDRO, R. P.; SAVASINI, K. V.; BERNUCCI, L. L. B.; CASTELO BRANCO, V. T. F. **Influência das propriedades de forma da fração graúda do agregado no controle da deformação permanente de misturas asfálticas densas**. Transportes, v. 29, n. 2, p. 2395, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/transportes.v29i2.2395>

LEE, D; DUTT, R. N. **Evaluation of gap-graded asphalt concrete mixtures**. Highway Research Record, n. 361, p. 47–57, 1971. Washington, D.C.: Highway Research Board (HRB), National Research Council, 1971. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1971/361/361-006.pdf>

LEITE, L. M. F. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 303 p., 1999. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-14062008-202738/publico/PILATI2008.pdf>

LIMA, C. S. **Caracterização de ligantes asfálticos modificados com borracha de pneu e aditivo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4871/1/2008_dis_cslima.pdf

LIU, C., WANG, H., LIU, S., YANG, D. E XIONG, Y. **Performance Evaluation of Asphalt-Pavement Crack-Repair Materials**. *Materials*, v. 18, n. 7, p. 1611, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma18071611>

LO PRESTI, D. **Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review**. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 863–881, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>

LOPES, L. N. **Fadiga e deformação permanente em ligante e mistura asfáltica modificados com borracha pré-tratada (RAR)**. Tese (Doutorado em Geotecnia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/45170>

LÓPEZ-GARCÍA, R. D., MALDONADO-REYES, A., REYES-GALLEGOS, M. M., RODRÍGUEZ-GARCÍA, J. A., CALLES-ARRIAGA, C. A., & ROCHA-RANGEL, E. **Management and Disposal of Waste Tires to Develop a Company for the Manufacture of Products Based on Recycled Rubber in Tamaulipas, México**. *Processes*, v. 13, n. 2, p. 394, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr13020394>

LV, S; WANG, Z; ZHU, X; YUAN, J; PENG, X. **Research on strength and fatigue properties of asphalt mixture with different gradation curves**. *Construction and Building Materials*, v. 364, art. 129872, 18 jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129872>

MA, Y; YIN, T; XIE, T; CAI, B; ZHAO, Q; YU, H; GONG, X; ZHANG, X; XIANG, H. **Influence of rubber cross-linking degree on compatibility and performance of modified asphalt: rheological characterization and molecular simulation**. *Case Studies in Construction Materials*, v. 23, e05487, dez. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05487>

MAIA, I. G; MOTTA, L. M. G; COUTINHO, R. Q; PERAÇA, V. **Análise do desempenho mecânico de mistura asfáltica composta por péletes de asfalto-borracha comparado com as classes de fadiga do MeDiNa**. In: Encontro Nacional De Conservação Rodoviária (Enacor), 25.; Reunião Anual De Pavimentação (RAPv), v. 48., Anais 2023. DOI: <https://doi.org/10.29327/1304307.48-53>

MALTA, Y. G. C. **Desempenho à deformação permanente de ligantes com diferentes origens e misturas asfálticas preparadas com CAP puro e modificado por polímero**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2023. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/33950>

MARINHO FILHO, P. G. T. **Análise do comportamento reológico e de envelhecimento de ligantes asfálticos contendo nanofibrilas de celulose**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e

Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/33526>

MASHAAN, N. S. A review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement. *The Scientific World Journal*, [s. l.], v. 2014, Article ID 214612, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2014/214612>

MENARES, T.; HERRERA, J; ROMERO, R; OSORIO, P; ARTEAGA-PÉREZ, L. E. **Waste tires pyrolysis kinetics and reaction mechanisms explained by TGA and Py-GC/MS under kinetically-controlled regime.** *Waste Management*, v. 102, p. 21–29, 1 fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.027>

MENSCH, N. G. **Modelagem da deformação permanente de misturas asfálticas a partir de princípios viscoplásticos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/271961>

MUSSELMAN, JAMES A.; WALBECK, T. **Asphalt Rubber Gap-Graded Mixtures: How-To Document.** Washington, DC: Federal Highway Administration (FHWA), 2024. (Report No. FHWA-HIF-24-021). Disponível em: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/tops/pubs/tops_argg_how_to_report.pdf.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil.** Dissertation (Doctor of Philosophy) — North Carolina State University, Raleigh, 2015. Disponível em: <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/10651>

NASCIMENTO, L. A. H.; ROCHA, S. M. N.; NASCIMENTO, C. E. H.; KIM, Y. R.; CHACUR, M.; MARTINS, A. T. **Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras.** In: ENCONTRO DE ASFALTO DO IBP, 21., 2014, Rio de Janeiro: IBP, 2014. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Ligantes%20e%20Misturas%20Asf%C3%A1lticas%20II/7_554_AC.pdf

NAPA. NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **Flow Number Test.** [s.l.]: NAPA, s.d. (ficha técnica). Disponível em: <https://www.asphalt pavement.org/uploads/documents/2-Flow Number Test UofMD.pdf>

NEUPANE, P; WU, S. **A comprehensive review of moisture damage in asphalt mixtures: Mechanisms, evaluation methods, and mitigation strategies.** *Construction and Building Materials*, v. 471, art. 140740, 11 abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140740>

NZTA. NEW ZEALAND TRANSPORT AGENCY. Removing barriers to the use of crumb rubber in roads. Wellington: NZ Transport Agency, 2016. (NZTA research report 578). Disponível em: <https://nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/578/578-removing-barriers-to-the-use-of-crumb-rubber-in-roads.pdf>.

NOROUZI, A; KIM, Y. R. **Mechanistic evaluation of fatigue cracking in asphalt pavements**. International Journal of Pavement Engineering, v. 18, n. 6, p. 530–546, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1095909>.

NUNES, L. C. **Fadiga de misturas asfálticas descontínuas com asfalto-borracha de 4ª geração**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/23583>

NUNES, C. G. L. Estudo do comportamento de misturas asfálticas modificadas por borracha de pneus inservíveis. 2019. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

ODA, S; FERNANDES J. J. L. **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação**. Acta Scientiarum (Maringá), Maringá, v. 23, n. 6, p. 1589-1599, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v23i0.2804>

OLIVEIRA, J. A; SOARES, J. B; BABADOPOULOS, L. F; **Fundamentos de mecânica do dano e de viscoelasticidade para prever desempenho de misturas asfálticas quanto à fadiga**. Transportes, v. 31, n. 3, e2745, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i3.2745>

PENG, Y; GAO, H. **Comparative modelling of indirect tensile strength of asphalt mixtures with and without considering air void characteristics**. International Journal of Pavement Engineering, v. 22, n. 12, p. 1601–1610, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym17243272>

PHOENIX INDUSTRIES. PelletPAVE – Rubber Modified Binder Additives For Hot Mix Asphalt. Disponível em: <https://pelletpave.com/>

PILATI, F. **Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas**. pág.210. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: (PDF/BDTD-USP). <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-14062008-202738/publico/PILATI2008.pdf>

PIVETTA, F. C. **Análise de regeneração em misturas asfálticas através da mecânica do dano contínuo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/189224>

POSSEBON, É. P.; OLIVEIRA, A. A.; RAMOS, V. N.; BRONDANI, C.; SPECHT, L. P.; PEREIRA, D. S. **Avaliação da resistência à deformação permanente e ao dano por fadiga de misturas asfálticas com dois ligantes modificados e um convencional do estado do Rio Grande do Sul**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES (ANPET), 33., 2019, Balneário Camboriú. Anais [...]. Rio de Janeiro: ANPET, 2019. p. 1695–1706. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/33950/1/deformacaopolimeromisturaligante.pdf>

PRESTI, D. L. **Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: a literature**. Construction and Building Materials, [S. l.], v. 49, p. 863-881, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813008477>

QUEIROZ, R. F.; RODRIGUES, J. K.; PATRICIO, J. D.; SILVA, P. H.; CARVALHO, J. R.; MELO NETO, O. M.; RODRIGUES, L. G.; LIMA, R. K. B. **Linear viscoelastic properties and fatigue S-VECD based evaluation of polymer-modified asphalt mixtures**. Journal of Building Engineering, p. 106916, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106916>

RASHED, A. M.; AL-HADIDY, A. I. **Comparative performance of DG mixes and SMA mixes with waste crumb rubber as aggregate replacement**. Case Studies in Construction Materials, v. 19, e02615, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02615>

RECICLANIP. **Indústria nacional de pneus ultrapassa meta de destinação do Ibama: em 2017, mais de 458 mil toneladas de pneus foram destinadas corretamente, segundo o Relatório de Pneumáticos** 2018. São Paulo: Reciclanip, 2018. Disponível em: https://www.reciclanip.org.br/sitewp/wp-content/uploads/2018/09/Release_Reciclanip_Relatorio-IBAMA-2018_aprovado.pdf

RIEKSTINS, A., HARITONOV, V., & STRAUPE, V. **Economic and environmental analysis of crumb rubber modified asphalt**. Construction and Building Materials, v. 335, p. 127468, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127468>

RODRIGUES, B. S.; PAES, H. V. **Análise do asfalto-borracha na pavimentação no Brasil: uma revisão de literatura**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade

Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/items/d2eb8f6f-4a4e-4906-8f44-ad67f7a8262f>

SAHEBZAMANI, H; ALAVI, M. Z; FARZANEH, O; MONIRI, A. **Laboratory and field investigation of the effect of polymerized pellets on the fatigue and low-temperature performance of asphalt mixtures.** Construction and Building Materials, v. 323, art. 126527, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126527> .

SCHAPERLY, R. A. **A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure.** Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 38, n. 2, p. 215–253, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(90\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0022-5096(90)90035-3).

SCHUSTER, S. L.; FACCIN, C.; BOEIRA, F. D. **Fatigue behaviour of plant produced asphalt mixtures through viscoelastic continuum damage model.** Road Materials and Pavement Design, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 59–85, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2009011>

SHAN, L.; YANG, H.; GUO, F.; LI, Z. **Fatigue damage evolution in asphalt mixture based on X-ray CT images.** Construction and Building Materials, v. 358, p. 129242, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129242>.

SHIRODKAR, P.; MEHTA, Y. NOLAN, A; DAHM, K; DUSSEAU, R; MCCARTHY, L. **Characterization of creep and recovery curve of polymer modified binder.** Construction and Building Materials, v. 34, p. 504–511, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.018>

SIDHU, C. **End Use Definitions Project: Rubber Modified Asphalt.** CATRA (Canadian Association of Tire Recycling Agencies), 2020. Disponível em: https://www.catraonline.ca/storage/files/shares/publications-en/CATRA_final_RMA_paper_for_website-Aug2020-R3.pdf

SIERRA-CARRILLO A. F. J.; MORENO-NAVARRO, F.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. **Analysis of the Real Performance of Crumb-Rubber-Modified Asphalt Mixtures.** Materials, Basel, v. 15, n. 23, art. 8366, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15238366>

SILVA, L.; BENTA, A; PICADO-SANTOS, L. **Asphalt rubber concrete fabricated by the dry process: Laboratory assessment of resistance against reflection cracking.** Construction and Building Materials, v. 160, p. 539-550, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143438>

SILVA, C. C. V. P. **Análise das propriedades de ligante asfáltico modificado com terpolímero reativo e partículas micro e nanométricas de carbonato de cálcio e de rejeito da mineração do quartzito.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2025. Disponível em: <https://www.ppgeca.ufcg.edu.br/teses-menu/teses-2025/send/220-teses-2025/1011-analise-das-propriedades-de-ligante-asfaltico-modificado-com-terpolimero-reativo-e-particulas-micro-e-nanometricas-de-carbonato-de-calcio-e-de-rejeito-da-mineracao-do-quartzito>

SOUZA, I. N. R. T.; MATA, M. S. S.; GUEDES, R. O. **Análise da utilização do asfalto borracha na pavimentação como uma solução técnica e sustentável.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, ano 6, ed. 12, v. 4, p. 5-19, dez. 2021. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/asfalto-borracha>

SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. **Asfalto-borracha e borracha-agregado: possibilidades de utilização de borracha reciclada em misturas asfálticas.** Revista Estradas, Porto Alegre, v. 4, p. 18-26, jun. 2003.

UNDERWOOD, B. S.; BAEK, C.; KIM, Y. R. **Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, [s. l.], v. 2296, n. 1, p. 36–45, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2296-04>

USTMA. TIRE MANUFACTURERS ASSOCIATION. **State of Knowledge Report on Rubber Modified Asphalt.** Washington, DC: USTMA, 2021.

ISTEA. **Intermodal Surface Transportation Efficiency Act of 1991.** Washington, DC: U.S. Congress, 1991. Disponível em: <https://www.congress.gov/bill/102nd-congress/house-bill/2950>

VAN KIRK, J. L.; HOLLERAN, G. **Reduced thickness asphalt rubber concrete leads to cost effective pavement rehabilitation.** In: WORLD OF ASPHALT PAVEMENTS, INTERNATIONAL CONFERENCE, 1., 2000, Sydney. Proceeding Kew: Australian Asphalt Pavement Association (AAPA), 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277103265_Rehabilitation_alternatives_using_new_asphalt_rubber_mixtures_with_Brazilian_materials

VOLLE, T. H. **Performance of rubberized asphalt pavements in Illinois.** Springfield, IL: Illinois Department of Transportation (IDOT), Bureau of Materials and Physical Research, 2000. Disponível em:

<https://library.ctr.utexas.edu/Presto/content/Detail.aspx?bmdc=MQ%3D%3D&ctID=UHVibGijYXRpb25fMTE2MTA%3D&rID=MTAxNA%3D%3D&ssid=c2NyZWVuSURfMTQ2MDk%3D>

ZHAO, Z., WU, S., XIE, J., YANG, C., YANG, X., CHEN, S., & LIU, Q. **Recycle of waste tire rubber powder in a novel asphalt rubber pellets for asphalt performance enhancement.** *Construction and Building Materials*, v. 399, p. 132572, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132572>

ZHAO, W., & YANG, Q. **Life-cycle assessment of sustainable pavement based on the coordinated application of recycled asphalt pavement and solid waste: Environment and economy.** *Journal of Cleaner Production*, v. 434, p. 140203, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140203>

YILDIRIM, Y. **Polymer modified asphalt binders.** *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 1, p. 66–72, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007>

WALUBITA, L. F.; UMASHANKAR, V.; HU, X.; JAMISON, B.; ZHOU, F; SCULLION, T; EPPS MARTIN, A; DESSOUKY, S. **New generation mix-designs: laboratory testing and construction of the APT test sections.** College Station, TX: Texas Transportation Institute (TTI), The Texas A&M University System; San Antonio, TX: The University of Texas at San Antonio, 2010. (Relatório técnico FHWA/TX-10/0-6132-1; Report 0-6132-1; Project 0-6132). Disponível em: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/17800/dot_17800_DS1.pdf

WANG, S., CHENG, D., & XIAO, F. **Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt.** *Construction and Building Materials*, v. 131, p. 101-113, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.077>

WANG, Y. D. **Development of the Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD) Model and its Applications in Asphalt Mixture Performance Evaluation.** 2019. Tese (Doutorado) – North Carolina State University, Raleigh, 2019.

WILLIAMS, R. CHRISTOPHER; PERALTA, J; PUGA, KA LAI N. G. **Development of non-petroleum-based binders for use in flexible pavements – Phase II: final report.** Ames, IA: Institute for Transportation (InTrans), Iowa State University, 2015. (IHRB Project TR-650; InTrans Project 12-447). Disponível em: https://www.intrans.iastate.edu/wp-content/uploads/2018/03/non-petro_binders_for_flexible-pvmts_II_w_cvr.pdf.

WU, C; SOUSA, B.; LI, A; ZHAO, Z. **Activated minerals as binder stabilizers in middle course's asphalt concrete paving mixtures.** In: Transportation Research Board Annual Meeting, 91., 2012.

Disponível em: <https://trid.trb.org/View/1129695>