

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE MECANÍSTICO-EMPÍRICA DO
COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS EM
RORAIMA A PARTIR DE DADOS EXPERIMENTAIS**

KÁSSIO GOMES FIALHO

ORIENTADOR: RAFAEL CERQUEIRA SILVA, D.Sc.

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-436/2026

BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2026

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE MECANÍSTICO-EMPÍRICA DO
COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS EM
RORAIMA A PARTIR DE DADOS EXPERIMENTAIS**

KÁSSIO GOMES FIALHO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**RAFAEL CERQUEIRA SILVA, D.Sc. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**MARIO SERGIO DE SOUZA ALMEIDA, D.Sc. (UFRB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 12 de MARÇO de 2026.

FICHA CATALOGRÁFICA

FIALHO, KÁSSIO GOMES

Análise Mecanístico-Empírica do Comportamento de Pavimentos Flexíveis em Roraima a Partir de Dados Experimentais [Distrito Federal] 2026.

xx, 127 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2026)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Pavimentação

2. Dimensionamento

3. Análise Mecanístico-Empírica

4. Trecho Experimental

I. ENC/FT/UnB

II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FIALHO, K. G. (2026). Análise Mecanístico-Empírica do Comportamento de Pavimentos Flexíveis em Roraima a Partir de Dados Experimentais. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-436/2026. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 127 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Kássio Gomes Fialho

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise Mecanístico-Empírica do Comportamento de Pavimentos Flexíveis em Roraima a Partir de Dados Experimentais.

GRAU / ANO: Mestre / 2026

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Kássio Gomes Fialho
Brasília/DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Antonio e Francisquinha, que sempre me apoiaram e incentivaram em toda a minha jornada acadêmica. Sem eles, nada disso seria possível. Muito obrigado!!

Agradeço também ao meu orientador, professor Rafael, por todo o apoio, pela confiança e pela parceria ao longo deste trabalho. Sou muito grato pela oportunidade de ser seu orientando.

Gostaria de agradecer ao Vinícius, que sempre esteve disposto a ajudar quando precisei. Obrigado pelas dicas, pelas opiniões, pelas sugestões, pela paciência e pela parceria.

Agradeço também a todos do Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER/DF), que foram extremamente prestativos e me ajudaram em tudo que precisei durante o desenvolvimento deste trabalho. Em especial, agradeço ao Mateus, Gisandra, Paulo, Tolentino e Sinval.

Meus agradecimentos ao Laboratório de Infraestrutura da Universidade de Brasília (Infralab) pelas oportunidades e pelo ambiente de aprendizado desde a graduação. Aproveito para agradecer também a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação. Em especial, agradeço ao Everton, Leticia, Isabela e Sanderson.

Agradeço também ao meu amigo e parceiro de laboratório, Arthur, que sempre me ajudou, tirou minhas dúvidas e sabe bem os desafios de um mestrado experimental.

Aos meus amigos de mestrado da Sala 2, fico muito feliz por ter compartilhado essa jornada com vocês no PPGG. Sou eternamente grato pela ajuda durante as disciplinas e pelos momentos de parceria. Obrigado Kelisson, Gabriel, Diana, Reinan e Paulo.

Meus agradecimentos também à equipe de engenharia do Ministério Público de Contas de Roraima (MPC/RR), que sempre esteve à disposição. Foi uma honra fazer parte deste projeto.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento desta pesquisa.

Agradeço ainda ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), à Superintendência Regional do DNIT no estado de Roraima pelo apoio ao longo deste projeto.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (PPGG/UnB) e a todos os professores do programa pelos ensinamentos e pela contribuição na minha formação.

Por fim, agradeço à Universidade de Brasília, uma instituição da qual tenho grande orgulho de fazer parte.

*“São apenas memórias. E, no fim,
acabamos transformando memórias
em nossas próprias imagens.”*

— Hirokazu Kore-eda

ANÁLISE MECANÍSTICO-EMPÍRICA DO COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS EM RORAIMA A PARTIR DE DADOS EXPERIMENTAIS

Esta pesquisa apresenta uma análise mecanístico-empírica do comportamento de pavimentos flexíveis no estado de Roraima, considerando as particularidades de materiais e clima da região Norte do Brasil. O objetivo do estudo é avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas utilizadas na camada de revestimento do Segmento Experimental (SE) da rodovia BR-432/RR, executado no âmbito do programa PRO-MeDiNa do DNIT, aplicando os resultados laboratoriais em modelagens computacionais realizadas no software MeDiNa. A metodologia consistiu na extração de placas de concreto asfáltico do segmento experimental para caracterização física, volumétrica e mecânica da mistura, bem como na análise individual dos materiais constituintes regionais, incluindo agregados minerais e ligante asfáltico CAP 50/70. Foram comparadas duas formulações de mistura: a Mistura A, correspondente ao material executado em campo, e a Mistura B, formulada com o teor ótimo de ligante definido no projeto de dosagem original. Os ensaios laboratoriais incluíram Resistência à Tração, Módulo de Resiliência e Vida de Fadiga, cujos resultados foram utilizados como parâmetros de entrada nas simulações do MeDiNa. Os dados das camadas granulares e do subleito empregados nas modelagens foram obtidos em estudos realizados por Caetano (2024) e Cardoso (2024) no mesmo segmento experimental. Os resultados indicaram que a mistura executada em campo apresentou teor de ligante superior ao previsto no projeto, reduzindo o volume de vazios e a rigidez da mistura. A mistura com teor ótimo apresentou maior módulo de resiliência, maior resistência à tração e melhor desempenho à fadiga. As simulações no MeDiNa indicaram que ambas as estruturas tenderiam a falhar por trincamento antes dos 10 anos de vida de projeto. Também foi verificada forte influência da umidade do subleito no comportamento do pavimento, com solos compactados abaixo da umidade ótima apresentando maior rigidez, porém maior suscetibilidade ao afundamento de trilha de roda. Os resultados obtidos reforçam a importância do controle tecnológico durante a execução das obras rodoviárias e evidenciam que o uso de métodos mecanístico-empíricos, aliado a dados laboratoriais representativos das condições regionais, é fundamental para o dimensionamento e a durabilidade de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave: Pavimentação, Análise Mecanístico-Empírica, MeDiNa, Módulo de Resiliência, Roraima.

MECHANISTIC-EMPIRICAL ANALYSIS OF FLEXIBLE PAVEMENT BEHAVIOR IN RORAIMA BASED ON EXPERIMENTAL DATA

This research presents a mechanistic–empirical analysis of the behavior of flexible pavements in the state of Roraima, considering the particular characteristics of materials and climate in the Northern region of Brazil. The main objective of the study was to evaluate the mechanical behavior of asphalt mixtures used in the surface layer of the Experimental Section (SE) of highway BR-432/RR, built as part of the PRO-MeDiNa program developed by DNIT, applying laboratory results in computational simulations using the MeDiNa software. The methodology consisted of extracting asphalt concrete slabs from the experimental section for physical, volumetric, and mechanical characterization of the mixture, as well as the individual analysis of the regional constituent materials, including mineral aggregates and CAP 50/70 asphalt binder. Two mixture formulations were compared: Mixture A, corresponding to the material actually executed in the field, and Mixture B, formulated with the optimum binder content defined in the original mix design. Laboratory tests included Indirect Tensile Strength, Resilient Modulus, and Fatigue Life, whose results were used as input parameters for the MeDiNa simulations. The data for the granular layers and subgrade used in the simulations were obtained from studies conducted by Caetano (2024) and Cardoso (2024) on the same experimental section. The results indicated that the mixture executed in the field presented a higher binder content than specified in the original design, reducing the air void content and the stiffness of the mixture. The mixture with the optimum binder content showed a higher resilient modulus, higher tensile strength, and better fatigue performance. Simulations performed in MeDiNa indicated that both pavement structures would tend to fail by fatigue cracking before the 10-year design life. A strong influence of subgrade moisture on pavement performance was also observed, with soils compacted below optimum moisture presenting higher stiffness, but greater susceptibility to rutting. The results highlight the importance of strict quality control during road construction and demonstrate that the use of mechanistic–empirical methods, combined with laboratory data representative of regional conditions, is essential for the design and durability of highway pavements.

Keywords: Pavement Engineering; Mechanistic–Empirical Analysis; MeDiNa; Resilient Modulus; Roraima.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Justificativa.....	24
1.2	Objetivos Gerais.....	25
1.3	Objetivos Específicos.....	25
1.4	Estrutura da Dissertação.....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1	Evolução dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos.....	27
2.2	Métodos Mecânico-Empíricos.....	28
2.3	Comportamento de Materiais Viscoelásticos.....	30
2.4	Sucção	32
2.5	Efeitos da Umidade na Estrutura do Pavimento.....	33
2.6	Propriedades Mecânicas de Materiais de Pavimentação.....	33
2.6.1	Resiliência	34
2.6.2	Ensaio de Cargas Repetidas.....	34
2.6.3	Ensaio de Vida de Fadiga.....	35
2.7	Segmento Experimental	35
2.7.1	Clima da Região.....	35
2.7.2	Caracterização dos Materiais de Subleito, Sub-base e Base	36
2.7.3	Relação entre Módulo de Resiliência e Sucção no Subleito.....	37
2.8	Método do Dimensionamento Nacional (MeDiNa).....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	Caracterização da Área de Estudo.....	40
3.2	Metodologia	41
3.3	Materiais Estudados	41
3.4	Programa Experimental.....	41
3.5	Coleta das Amostras.....	42
3.6	Caracterização da Camada de Revestimento dos Segmentos Experimentais	43

3.6.1	Densidade Máxima Medida (Rice Test).....	44
3.6.1	Teor de Ligante pelo Método da Ignição	45
3.6.2	Análise Granulométrica por Peneiramento	45
3.6.3	Massa Específica Aparente	46
3.7	Caracterização do Agregado Mineral.....	46
3.7.1	Abrasão Los Angeles	47
3.7.2	Índice de Forma.....	47
3.7.3	Massa Específica e Absorção do Agregado Graúdo	48
3.7.4	Massa Específica e Absorção do Agregado Miúdo	49
3.7.5	Adesividade.....	50
3.7.6	Teor de Vazios	50
3.7.7	Equivalente de Areia	51
3.8	Caracterização do Ligante.....	52
3.8.1	Viscosidade Rotacional	53
3.8.2	Ponto de Amolecimento	54
3.8.3	Penetração	55
3.8.4	Propriedades Reológicas	55
3.8.5	MSCR – Multiple Stress Creep and Recovery.....	58
3.8.6	Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional (RTFOT) 59	
3.8.7	LAS – <i>Linear Amplitude Sweep</i>	60
3.9	Compactação dos Corpos de Prova.....	61
3.10	Ensaio Mecânicos	62
3.10.1	Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	63
3.10.2	Módulo de Resiliência.....	63
3.10.3	Vida de Fadiga	65
3.11	Análises Computacionais	65

3.11.1	Cenários Modelados Computacionalmente.....	66
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	69
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E VOLUMÉTRICA DA CAMADA DE REVESTIMENTO DO SEGMENTO EXPERIMENTAL.....	69
4.1.1	Porcentagem de Asfalto	69
4.1.2	Densidade Relativa Máxima	70
4.1.3	Densidade Relativa Aparente	70
4.1.4	Demais Parâmetros Volumétricos.....	71
4.1.5	Curva Granulométrica dos Agregados Minerais.....	72
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MINERAIS	73
4.2.1	Análise Granulométrica.....	73
4.2.2	Densidade Real, Densidade Aparente e Absorção.....	76
4.2.3	Adesividade.....	78
4.2.4	Equivalente de Areia	79
4.2.5	Índice de Forma dos Agregados Graúdos	80
4.2.6	Teor de Vazios dos Agregados Miúdos	81
4.2.7	Desgaste por Abrasão Los Angeles.....	82
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO	84
4.3.1	Penetração	84
4.3.2	Ponto de Amolecimento	84
4.3.3	Viscosidade Rotacional	85
4.3.4	Efeito do Calor e do Ar (RTFOT).....	86
4.3.5	Classificação por Grau de Desempenho (PG).....	87
4.3.6	Caracterização Reológica.....	88
4.3.7	<i>Multiple Stress Creep and Recovery</i> (MSCR)	90
4.3.8	<i>Linear Amplitude Sweep</i> (LAS)	92
4.4	PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DAS MISTURAS	93
4.5	ENSAIOS DE DESEMPENHO DA MISTURA ASFÁLTICA.....	94

4.5.1	Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	94
4.5.2	Módulo de Resiliência.....	95
4.5.3	Vida de Fadiga	97
4.6	ANÁLISES COMPUTACIONAIS.....	101
4.6.1	Cálculo do Número “N”	101
4.6.2	Cenários.....	102
4.6.3	Parâmetros de Entrada no MeDiNa.....	104
4.6.4	Efeito da Camada de Revestimento	105
4.6.5	Efeito da Geometria da Estrutura	109
4.6.6	Efeito da Umidade da Camada de Subleito.....	113
5	CONCLUSÃO	121
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	122
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Normas usadas nos ensaios de caracterização das placas de CA.	44
Tabela 3.2. Normas usadas nos ensaios de caracterização do agregado mineral.	46
Tabela 3.3. Normas usadas nos ensaios de caracterização do ligante asfáltico.	52
Tabela 3.4. Dados usados para compactação dos corpos de prova	61
Tabela 3.5. Normas usadas nos ensaios de caracterização mecânica de misturas asfálticas. ..	62
Tabela 3.6. Geometrias utilizadas para formação dos cenários	66
Tabela 3.7. Misturas utilizadas na formação dos cenários.	67
Tabela 3.8. Condições do subleito utilizadas na formação de cenários.	67
Tabela 3.9. Cenários a serem analisados no MeDiNa.	68
Tabela 4.1. Resultados do Ensaio de Porcentagem de Ligante Asfáltico	69
Tabela 4.2. Tabela de Resultados do <i>Rice Test</i>	70
Tabela 4.3. Dados do Ensaio de DRA.....	71
Tabela 4.4. Resultados de parâmetros volumétricos.	71
Tabela 4.5. Dados obtidos da caracterização física das placas de CA extraídas.....	72
Tabela 4.6. Resultado do ensaio de densidade real, aparente e absorção para brita 1.	76
Tabela 4.7. Resultado do ensaio de densidade real, aparente e absorção para brita 0.	77
Tabela 4.8. Resultado do ensaio de densidade real, aparente e absorção para pó de pedra.	77
Tabela 4.9. Resultado do ensaio de densidade real, aparente e absorção para areia.	78
Tabela 4.10. Resultados do ensaio de equivalente de areia para o agregado mineral pó de pedra.	79
Tabela 4.11. Resultados do ensaio equivalente de areia para o agregado mineral areia.....	79
Tabela 4.12. Porcentagens retidas nos crivos redutores para a brita 1.....	80
Tabela 4.13. Porcentagens retidas nos crivos redutores para a brita 0.....	80
Tabela 4.14. Resultados do teor de vazios para o pó de pedra.....	81
Tabela 4.15. Resultados do teor de vazios para a areia.....	81
Tabela 4.16. Abrasão Los Angeles para brita 1	82
Tabela 4.17. Abrasão Los Angeles para brita 0	82
Tabela 4.18. Resumo dos resultados dos agregados minerais.....	83
Tabela 4.19. Resultado do ensaio de penetração por agulha.....	84
Tabela 4.20. Resultado do ensaio de anel e bola.....	84
Tabela 4.21. Resultados do ensaio de viscosidade Brookefield.....	85
Tabela 4.22. Variação de massa no ligante asfáltico devido ao efeito de calor e ar.	86

Tabela 4.23. Resultado da caracterização PG do ligante	87
Tabela 4.24. Resultados dos coeficientes que compõem a equação da vida de fadiga para o ligante CAP 50/70 estudado.....	92
Tabela 4.25. Propriedades de cada uma das misturas estudadas.....	93
Tabela 4.26. Resultados para o ensaio de resistência à tração da Mistura A	94
Tabela 4.27. Resultados para o ensaio de resistência à tração da Mistura B	94
Tabela 4.28. Resultados de MR para a Mistura A	95
Tabela 4.29. Resultados de MR para a Mistura B.....	96
Tabela 4.30. Resultado da vida de fadiga para a Mistura A.....	97
Tabela 4.31. Resultado da vida de fadiga para a Mistura B.....	99
Tabela 4.32. Coeficientes de ajuste da curva de vida de fadiga.	101
Tabela 4.33. Número de passagens do eixo padrão nos 12 meses de 2024 (Fonte: DNIT)...	102
Tabela 4.34. Cenários a serem analisados no MeDiNa.....	103
Tabela 4.35. Parâmetros de entrada no MeDiNa para camada de revestimento (Fonte: Autor)	104
Tabela 4.36. Dados de entrada para as camadas de base e sub-base. (Fonte: Caetano, 2024)	104
Tabela 4.37. Dados de entrada para camada de subleito. (Fonte: Cardoso, 2024)	105
Tabela 4.38. Evolução das patologias para o cenário MA-G1-OT	105
Tabela 4.39. Evolução das patologias para o cenário MB-G1-OT	106
Tabela 4.40. Evolução das patologias para o cenário MA-G2-OT	109
Tabela 4.41. Evolução das patologias para o cenário MA-G3-OT	110
Tabela 4.42. Evolução das patologias para o cenário MA-G1-COM+2%.....	113
Tabela 4.43. Evolução das patologias para o cenário MA-G1-COM-2%.....	114
Tabela 4.44. Evolução das patologias para o cenário MA-G1-POS+2%.....	116
Tabela 4.45. Evolução das patologias para o cenário MA-G1-POS-2%	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de um dimensionamento mecânico de pavimentos (Medina & Motta, 2015).....	29
Figura 2.2. Comportamento mecânico de misturas asfálticas dependendo da deformação e número de ciclos, dada uma mesma temperatura (Nunes, 2022).....	30
Figura 2.3. Origem da umidade na estrutura de pavimentos (Custódio <i>et al.</i> , 2021).....	33
Figura 3.1. Mapa de Localização do SE na BR-432/RR. (Fonte: adaptado do Google).....	40
Figura 3.2. Fluxograma de Organização da Pesquisa. (Fonte: Autor).	42
Figura 3.3. Geometria do Segmento Experimental estudado. (Fonte: Autor).....	43
Figura 3.4. Placas de Concreto Asfáltico (CA) extraídas do revestimento dos SE. (Fonte: Autor)	43
Figura 3.5. Extração de CP com a broca. (Fonte: Autor).....	44
Figura 3.6. Forno usado para queimar o asfalto das misturas estudadas.	45
Figura 3.7. Uso do crivo para execução do ensaio de índice de forma.	48
Figura 3.8. Agregados de brita 0 submersos pra o ensaio de massa específica.	48
Figura 3.9. Teste na areia para confirmar se o agregado chegou a condição de superfície saturado seca.	49
Figura 3.10. Pó de pedra na condição superfície saturada seca.	49
Figura 3.11. Execução do ensaio de teor de finos na areia estudada.	51
Figura 3.12. Realização do ensaio de equivalente de areia.	52
Figura 3.13. Viscosímetro <i>Brokefield</i> utilizado para aferir a viscosidade rotacional.	53
Figura 3.14. Equipamento de anel e bola automático usado no ensaio.....	54
Figura 3.15. Equipamento de penetração automático da <i>IPC Global-Controls</i>	55
Figura 3.16. Reômetro de cisalhamento dinâmico usado na pesquisa.	56
Figura 3.17. Formas para quantidade correta de ligante asfáltico a ser utilizado no reômetro.56	
Figura 3.18. Placas de 25 mm e de 8 mm usadas no reômetro da <i>Anton Paar</i>	57
Figura 3.19. Amostra recém inserida no reômetro.	57
Figura 3.20. Exterior e interior de um forno para ensaio de RTFOT.....	59
Figura 3.21. Compactador giratório usado para confecção dos corpos de prova de ambas as misturas.	62
Figura 3.22. Prensa usada nos ensaios de resistência à tração.	63
Figura 3.23. Equipamento utilizado para os ensaios de módulo de resiliência e vida de fadiga.	64

Figura 4.1. Curva granulométrica da mistura usada no revestimento dos SE.....	73
Figura 4.2. Curvas granulométricas resultantes do peneiramento dos agregados mineiras para a fração correspondente a (a) Brita 1, (b) Brita 0, (c) Pó de Pedra e (d) Areia.....	75
Figura 4.3. Resultado do ensaio de adesividade do agregado mineral.....	79
Figura 4.4. Gráfico da relação da temperatura do ligante com sua viscosidade.	86
Figura 4.5. Gráfico com a relação do $ G^* $ com o δ , no estado virgem e envelhecido.	88
Figura 4.6. Curva mestra do módulo dinâmico para temperatura de 25 °C para ligante virgem e envelhecido.....	89
Figura 4.7. Variação do $J_{nr3,2}$ em relação a temperatura.....	90
Figura 4.8. Susceptibilidade da deformação permanente ao aumento de carga em relação a temperatura.....	91
Figura 4.9. Vida de fadiga N_f em função dos valores de deformação cisalhante (γ).	92
Figura 4.10. Gráfico da vida de fadiga em função da diferença de tensões $\Delta\sigma$ para Mistura A.	98
Figura 4.11. Gráfico da vida de fadiga em função da deformação resiliente (ϵ_r) para Mistura A.	99
Figura 4.12. Gráfico da vida de fadiga em função da diferença de tensões $\Delta\sigma$ para Mistura B.	100
Figura 4.13. Gráfico da vida de fadiga em função da deformação resiliente (ϵ_r) para Mistura B.	101
Figura 4.14. Comparação da evolução da área trincada entre os cenários com diferentes camadas de revestimento.....	108
Figura 4.15. Comparação da evolução do afundamento de trilha de roda entre os cenários com diferentes camadas de revestimento.....	108
Figura 4.16. Comparação da evolução da área trincada entre os cenários com diferentes geometrias.	112
Figura 4.17. Comparação da evolução do afundamento de trilha de roda entre os cenários com diferentes geometrias.....	112
Figura 4.18. Comparação da evolução da área trincada entre os cenários com diferentes umidades da camada de subleito.	118
Figura 4.19. Comparação da evolução do afundamento de trilha de roda entre os cenários com diferentes umidades da camada de subleito.	119

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials.</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres.
ATR	Afundamento da Trilha de Roda.
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i> (Reômetro de Viga Fletida).
CA	Concreto Asfáltico.
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo.
CBR	Índice de Suporte Califórnia (<i>California Bearing Ratio</i>).
CNT	Confederação Nacional do Transporte.
CP	Corpo de Prova.
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
DP	Deformação Permanente.
DRA	Densidade Relativa Aparente.
DRM	Densidade Relativa Máxima.
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i> (Reômetro de Cisalhamento Dinâmico).
EA	Equivalente de Areia.
LA'	Laterítico Arenoso (Classificação MCT).
MCT	Metodologia de Classificação de Solos Tropicais.
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional.
MPC/RR	Ministério Público de Contas do estado de Roraima.
MR	Módulo de Resiliência.

MSCR	<i>Multiple Stress Creep and Recovery.</i>
NA'	Não Laterítico Arenoso (Classificação MCT).
Nf	Número de ciclos até a ruptura (Vida de Fadiga).
NS'	Não Laterítico Siltoso (Classificação MCT).
PG	Grau de Desempenho (<i>Performance Grade</i>).
PLA	Perda por Abrasão Los Angeles.
PRO-MeDiNa	Programa de implantação de Segmentos Experimentais do DNIT.
RBV	Relação Betume Vazios.
RT	Resistência à Tração.
RTFOT	<i>Rolling Thin-Film Oven Test</i> (Determinação do efeito do calor e do ar).
SE	Segmento Experimental.
VAM	Vazios no Agregado Mineral.
VMD	Volume Médio Diário.

LISTA DE SÍMBOLOS

$ G ^*$	Módulo Dinâmico de Cisalhamento (ou Módulo Complexo).
δ	Ângulo de fase.
τ	Tensão de cisalhamento.
γ	Deformação de cisalhamento.
J _{nr}	Complância não recuperável.
J _{nr3,2}	Complância não recuperável sob a tensão de 3,2 kPa.
J _{nrdiff}	Sensibilidade (diferença) da deformação permanente ao aumento de carga.
γ_{nr}	Deformação não recuperável.
ΔM	Variação de massa.

Gmm	Densidade Relativa Máxima da mistura asfáltica.
Gmb	Densidade Relativa Aparente da mistura compactada.
Gsb	Densidade aparente do agregado.
Gsa	Densidade real do agregado.
Pb	Porcentagem de Betume (Teor de ligante asfáltico).
F	Índice de forma dos agregados graúdos.
Ab	Absorção dos agregados.
U	Teor de vazios da amostra de agregado miúdo.
$\Delta\sigma$	Diferença de tensões aplicadas.
ϵ_r	Deformação resiliente (ou específica resiliente).
ϵ_t	Deformação de tração.
σ_t	Tensão de tração gerada no plano diametral.
k1, k2, k3	Coeficientes de ajuste para as curvas de vida de fadiga ou módulo de resiliência permanente.
$\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4$	Parâmetros de calibração exigidos pelo MeDiNa para os modelos de deformação permanente no subleito e nas camadas granulares

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil conta com uma malha rodoviária de aproximadamente 1,7 milhão de quilômetros de extensão, dos quais apenas cerca de 213,5 mil quilômetros são pavimentados, o que representa pouco mais de 12% da rede total (CNT, 2024). Esse dado evidencia não apenas a dimensão territorial do país, mas também a forte dependência do modo rodoviário para a integração econômica e social entre regiões. Paralelamente, a frota nacional atingiu a marca de 123 milhões de veículos, registrando crescimento de 42,5% nos últimos dez anos sendo que a região Norte registrou a maior alta, com 70,1% (CNT, 2024). Esse aumento expressivo da frota, associado à expansão urbana e ao crescimento da atividade econômica, tem resultado em maior solicitação estrutural das rodovias brasileiras, impondo desafios técnicos relevantes à engenharia de pavimentos.

A extensão da malha e o crescimento contínuo do número de veículos geram impactos sociais e econômicos significativos. O transporte rodoviário de cargas e passageiros desempenha papel estratégico na logística nacional, sendo responsável por grande parte do escoamento da produção agrícola, mineral e industrial. Segundo a ANTT (2024), o transporte rodoviário emprega aproximadamente 1,9 milhão de pessoas, representando 68,7% dos postos de trabalho no setor de transportes e 4,1% do total de empregos privados com carteira assinada no país. Além disso, o transporte terrestre interestadual atendeu cerca de 43 milhões de passageiros em 2023 (ANTT, 2023), evidenciando sua relevância também no deslocamento de pessoas, especialmente em regiões com menor oferta de transporte ferroviário ou aéreo.

Dessa forma, o modo rodoviário permanece como o principal sistema de transporte do Brasil, tanto em termos de volume quanto de abrangência territorial. Nesse contexto, a pavimentação assume papel fundamental, tendo como objetivo garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano, sob diferentes condições climáticas, além de proporcionar conforto ao rolamento, segurança viária e redução dos custos operacionais dos veículos (Bernucci et al., 2022). Pavimentos adequadamente dimensionados e executados contribuem para a diminuição do consumo de combustível, redução da emissão de poluentes e mitigação de acidentes causados por defeitos superficiais.

Entretanto, apesar da importância estratégica das rodovias, a condição da malha pavimentada brasileira ainda apresenta deficiências significativas. Em 2024, 56,9% dos pavimentos foram classificados como regulares, ruins ou péssimos, apresentando defeitos como trincas em malha e remendos em 30,7% das rodovias, além de afundamentos, ondulações e buracos em 5,0% da extensão avaliada (CNT, 2024). Esses dados evidenciam a necessidade de maior investimento em manutenção, reabilitação e, sobretudo, aprimoramento técnico nos processos de dimensionamento e controle tecnológico das obras rodoviárias.

Nesse cenário, é função do engenheiro de pavimentos buscar soluções que aliem eficiência estrutural, viabilidade econômica e durabilidade. Para evitar falhas prematuras antes do término da vida útil de projeto, torna-se imprescindível compreender os mecanismos de degradação que atuam na estrutura do pavimento e o comportamento mecânico dos materiais sob carregamentos repetidos. O desenvolvimento de modelos preditivos confiáveis para a evolução dos defeitos constitui um grande desafio, especialmente considerando a diversidade geológica, pedológica e climática do território brasileiro (Balbo, 2007). Solos tropicais, elevados índices pluviométricos em determinadas regiões e variações térmicas significativas influenciam diretamente o desempenho estrutural.

O método de dimensionamento tradicionalmente utilizado no Brasil é o método do DNER (DNIT, 2006), de caráter essencialmente empírico. Esse método baseia-se principalmente no ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e em correlações derivadas da pista experimental da AASHO Road Test, realizada nos Estados Unidos. A metodologia enfatiza a espessura das camadas granulares de base e sub-base, priorizando a segurança contra a ruptura plástica do subleito (Medina & Motta, 2015). Embora tenha representado um avanço importante em sua época, esse método não considera explicitamente os estados de tensão e deformação na estrutura, tampouco os fenômenos de fadiga e deformação permanente de forma mecanicista.

No contexto brasileiro, diversos pesquisadores defendem que a principal forma de degradação estrutural em pavimentos asfálticos é a danificação por fadiga (Balbo, 2007), caracterizada pela formação progressiva de trincas devido à repetição de cargas de tráfego. Além disso, a deformação permanente acumulada, manifestada como afundamento de trilha de roda, constitui outro mecanismo crítico, especialmente sob elevadas temperaturas e tráfego pesado. Assim, torna-se fundamental considerar de forma integrada todos os mecanismos de deterioração: fadiga das camadas mais rígidas (revestimento asfáltico e camadas cimentadas), deformações permanentes nas camadas granulares e no subleito e ruptura plástica (Medina & Motta, 2015).

Em resposta a essas limitações, os métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos surgem como alternativa mais racional e tecnicamente fundamentada. Nesse enfoque, o pavimento é tratado como uma estrutura de engenharia composta por múltiplas camadas, cujo comportamento é analisado com base nas teorias da elasticidade e da mecânica dos materiais. Conforme destaca Franco (2007), as tensões e deformações induzidas pelo carregamento são calculadas e relacionadas a modelos de desempenho, permitindo associar, por exemplo, as tensões de tração na base da camada asfáltica à ocorrência de trincas por fadiga, ou as deformações verticais no topo do subleito ao desenvolvimento de deformação permanente.

Nesse contexto, foi desenvolvido o software MeDiNa, fruto de parceria entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (Coppe/UFRJ). O programa utiliza um modelo elástico-linear de múltiplas camadas para estimar tensões, deformações e deslocamentos na estrutura do pavimento, possibilitando análises mais refinadas em comparação ao método puramente empírico. O MeDiNa representa um marco na modernização do dimensionamento de pavimentos no Brasil, aproximando-o das práticas internacionais.

Contudo, a hipótese de comportamento elástico-linear não representa integralmente a complexidade dos materiais asfálticos e granulares. O ligante asfáltico apresenta comportamento viscoelástico dependente da temperatura e da taxa de carregamento, enquanto os materiais granulares e solos exibem respostas não lineares e sensíveis à umidade. Além disso, as condições climáticas brasileiras, com variações sazonais de precipitação e temperatura, influenciam significativamente o desempenho estrutural. Diante disso, torna-se indispensável realizar calibrações campo-laboratório, de modo a ajustar as funções de transferência que relacionam os parâmetros mecanicistas ao desempenho observado em campo.

Como parte desse esforço de calibração e validação, o DNIT implementou o programa PRO-MeDiNa (DNIT, 2023a), voltado à implantação e monitoramento de Segmentos Experimentais (SE) em diferentes regiões do país. Esses segmentos permitem acompanhar o desempenho real das estruturas sob condições específicas de tráfego e clima, fornecendo dados essenciais para o aprimoramento das funções de transferência e maior confiabilidade do método mecanístico-empírico. Um dos produtos desse programa foi o ajuste da função sigmoideal para cálculo da área trincada apresentado por Almeida *et al.* (2024) e implementado no MeDiNa 2.0.0.

Assim, esta pesquisa insere-se em um contexto mais amplo de aprimoramento do dimensionamento mecanístico-empírico no Brasil, contribuindo para a consolidação de um

método mais representativo das condições reais de tráfego, clima e materiais encontrados no território nacional, com especial atenção às peculiaridades da região Norte e no estado de Roraima.

1.1 Justificativa

O sistema rodoviário brasileiro possui relevância estratégica para a integração territorial e o desenvolvimento econômico, sobretudo em razão das dimensões continentais do país e da forte dependência do transporte terrestre. Nesse cenário, os métodos de dimensionamento de pavimentos precisam representar de forma consistente as condições reais de solicitação impostas pelo tráfego e pelo clima, considerando a heterogeneidade dos materiais empregados nas diferentes regiões. Mais do que assegurar a estabilidade estrutural do subleito, torna-se indispensável que esses métodos incorporem critérios de desempenho capazes de contemplar os principais mecanismos de deterioração observados em campo, com foco na vida útil e na durabilidade do revestimento asfáltico.

No âmbito da consolidação dos métodos mecanístico-empíricos no Brasil, como o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), assume papel central a caracterização laboratorial detalhada das misturas asfálticas e das demais camadas constituintes do pavimento. A adequada determinação de propriedades mecânicas, como módulo de resiliência, resistência à fadiga e suscetibilidade à deformação permanente, é fundamental para que os modelos computacionais consigam reproduzir, com maior fidelidade, o comportamento estrutural da pavimentação ao longo do tempo. Dessa forma, a modelagem deixa de ser apenas uma ferramenta teórica e passa a se aproximar efetivamente das condições reais de campo.

Essa discussão ganha ainda mais importância quando se analisam estados como Roraima e, de modo mais amplo, a região Norte do Brasil. Trata-se de uma área com grande potencial de expansão da infraestrutura rodoviária, marcada por extensas distâncias, baixa densidade de transportes alternativos e condições geotécnicas e climáticas particulares. Nessas circunstâncias, o desenvolvimento de estudos regionais e a calibração adequada dos modelos de dimensionamento tornam-se essenciais para garantir soluções técnicas mais seguras, duráveis e economicamente viáveis para a ampliação e manutenção da malha viária.

1.2 Objetivos Gerais

Avaliar o comportamento mecânico da mistura asfáltica utilizada na camada de revestimento de um Segmento Experimental implantado no âmbito do programa PRO-MeDiNa na rodovia BR-432/RR, por meio da caracterização física, volumétrica e mecânica, bem como da aplicação desses resultados em simulações mecanístico-empíricas no software MeDiNa, com o objetivo de analisar o desempenho estrutural do pavimento e contribuir para o aprimoramento do dimensionamento e execução de pavimentos no estado de Roraima.

1.3 Objetivos Específicos

- Incrementar no banco de dados dos materiais de pavimentação no estado de Roraima por meio do estudo das propriedades dos materiais usados no segmento experimental incluindo mistura asfáltica, agregados minerais e ligante asfáltico CAP 50/70, por meio de ensaios laboratoriais de caracterização física e reológica;
- Avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas por meio de ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e vida de fadiga;
- Comparar o desempenho mecânico da mistura executada em campo com uma mistura formulada com teor ótimo de ligante definido no projeto de dosagem; e
- Determinar a influência da geometria, teor de umidade da camada de subleito no desempenho mecânico do pavimento do segmento experimental.

1.4 Estrutura da Dissertação

Este trabalho está dividido em cinco capítulos principais, organizados da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução

Apresenta a contextualização do problema de pesquisa frente à realidade da infraestrutura rodoviária brasileira, detalha a justificativa para a realização do estudo e define os objetivos gerais e específicos que norteiam o trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Apresenta o referencial teórico necessário para fundamentar os ensaios laboratoriais e as análises computacionais executadas nesta pesquisa. O capítulo aborda as propriedades mecânicas dos materiais de pavimentação, o conceito do dimensionamento mecanístico-

empírico e revisa os estudos já existentes sobre os materiais das camadas granulares e do subleito do Segmento Experimental.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

Detalha a origem dos materiais estudados, provenientes do Segmento Experimental (SE) da BR-432/RR. O capítulo também apresenta o programa experimental metodológico adotado, descrevendo a coleta das amostras, as normativas empregadas para a caracterização dos agregados e do ligante, para os ensaios de desempenho das misturas asfálticas e relata a rotina metodológica das análises computacionais.

Capítulo 4 – Apresentação e Análise dos Resultados

Expõe e discute os dados obtidos ao longo da pesquisa. A seção abrange a caracterização física e volumétrica das placas extraídas da camada de revestimento do SE, a análise dos agregados minerais regionais e do ligante asfáltico, e os ensaios de desempenho mecânico das misturas. Por fim, apresenta os resultados das análises computacionais mecanístico-empíricas geradas no software MeDiNa, avaliando diferentes cenários de projeto e execução.

Capítulo 5 – Conclusão

Apresenta as considerações finais e as principais conclusões extraídas dos ensaios e das simulações computacionais, consolidando os achados da pesquisa em relação aos objetivos iniciais.

Capítulo 6 – Referências Bibliográficas

O capítulo apresenta os documentos técnicos e acadêmicos utilizados como apoio no desenvolvimento da dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão apresentados o contexto e a teoria estudados e aplicados no desenvolvimento dessa pesquisa. A revisão bibliográfica foi feita com o objetivo de fundamentar os ensaios laboratoriais e as análises computacionais a serem feitas neste estudo.

2.1 Evolução dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos

O dimensionamento de pavimentos consiste na definição da estrutura e das espessuras das camadas que compõem o pavimento de modo que essas camadas sejam capazes de suportar as solicitações impostas pelo tráfego e pelas condições ambientais e consigam transferi-los às camadas subjacentes pelo tráfego e pelas condições ambientais ao longo de toda a sua vida de serviço.

Ao longo do tempo diferentes métodos de dimensionamento do pavimento foram estudados e aperfeiçoados, com o objetivo de garantir que a rodovia permaneça sem defeitos pelo tempo de vida útil escolhido. O estudo da escolha correta dos materiais para que as tensões e deslocamentos solicitantes no pavimento sejam compatibilizados com as propriedades dos materiais e a espessura das camadas é chamado de mecânica dos pavimentos (Bernucci et al, 2022).

Atualmente em uso hoje no Brasil, o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER foi elaborado pelo engenheiro Murillo Lopes no início da década de 1960, e este método é baseado em estudos da USCE e utiliza o ensaio de CBR, além de conceitos como coeficiente de equivalência estrutural que vem da pista experimental da AASHO (Medina & Motta, 2015).

Segundo Huang (2003), os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos podem ser classificados em cinco categorias: métodos empíricos, com ou sem ensaio de resistência do solo; métodos que limitam a ruptura por cisalhamento; métodos que limitam a ruptura por deformação vertical; métodos baseados no desempenho de pavimentos em pistas experimentais; e métodos mecanístico-empíricos.

O método do DNER é considerado um método empírico, pois o dimensionamento do pavimento neste método tem sua base em pistas experimentais e ensaios laboratoriais. Segundo Motta

(1991) os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos tradicionais têm uma forte dose de empirismo e hoje em dia um dos grandes objetivos dos engenheiros de pavimentação é diminuir essa influência dos métodos empíricos.

Com o avanço do conhecimento sobre o comportamento dos materiais de pavimentação, foram surgindo novos métodos que levam em consideração mecânica dos materiais, teoria da elasticidade e análise estrutural. (Huang, 2003).

No método mecanístico-empírico o pavimento é analisado como um sistema multicamadas submetidas às cargas provenientes do tráfego, sendo possível calcular tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos da estrutura por meio de modelos baseados na teoria da elasticidade. Franco (2007) afirma que a necessidade da modelagem mecanística-empírica vem da busca constante de se melhorar os projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural, de modo a utilizar materiais, sobre cujo desempenho de campo ainda não se têm experiência suficiente, e considerar, também, os efeitos das condições ambientais e de tráfego, diferentes daquelas para as quais os Métodos Empíricos, ainda utilizados no país, foram desenvolvidos.

No Brasil, os avanços no campo do dimensionamento mecanístico-empírico culminaram no desenvolvimento do método MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), desenvolvido no âmbito de pesquisas coordenadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em parceria com universidades e centros de pesquisa. O método MeDiNa utiliza parâmetros mecânicos obtidos em laboratório, como módulo de resiliência e resistência à tração de misturas asfálticas, além de modelos de previsão de dano para estimar o desempenho estrutural dos pavimentos ao longo de sua vida útil.

2.2 Métodos Mecanístico-Empíricos

Métodos mecanístico-empíricos consistem em metodologias que seguem uma rotina de ações como a seguir: usam-se dados de entrada como fatores ambientais, tráfego, materiais e técnicas de construção e dado parâmetros de projeto (espessura das camadas), com essas informações calculados as tensões e deformações na estrutura do pavimento e por meio de uma função de transferência é determinado o desempenho do pavimento (evolução dos defeitos) ao longo do tempo.

Esse é uma rotina genérica e para cada caso é necessário ajustes, por exemplo, como a será a considerado as cargas de tráfego e o método de cálculo das tensões e deformações. Como a

modelagem deve atender a estas especificidades, cada análise deve ter suas próprias hipóteses, o que reforça o papel da mecânica dos pavimentos (Medina & Motta, 2015).

Medina & Motta (2015) apresentam um fluxograma básico de como funciona um método mecanístico-empírico (Figura 2.1).

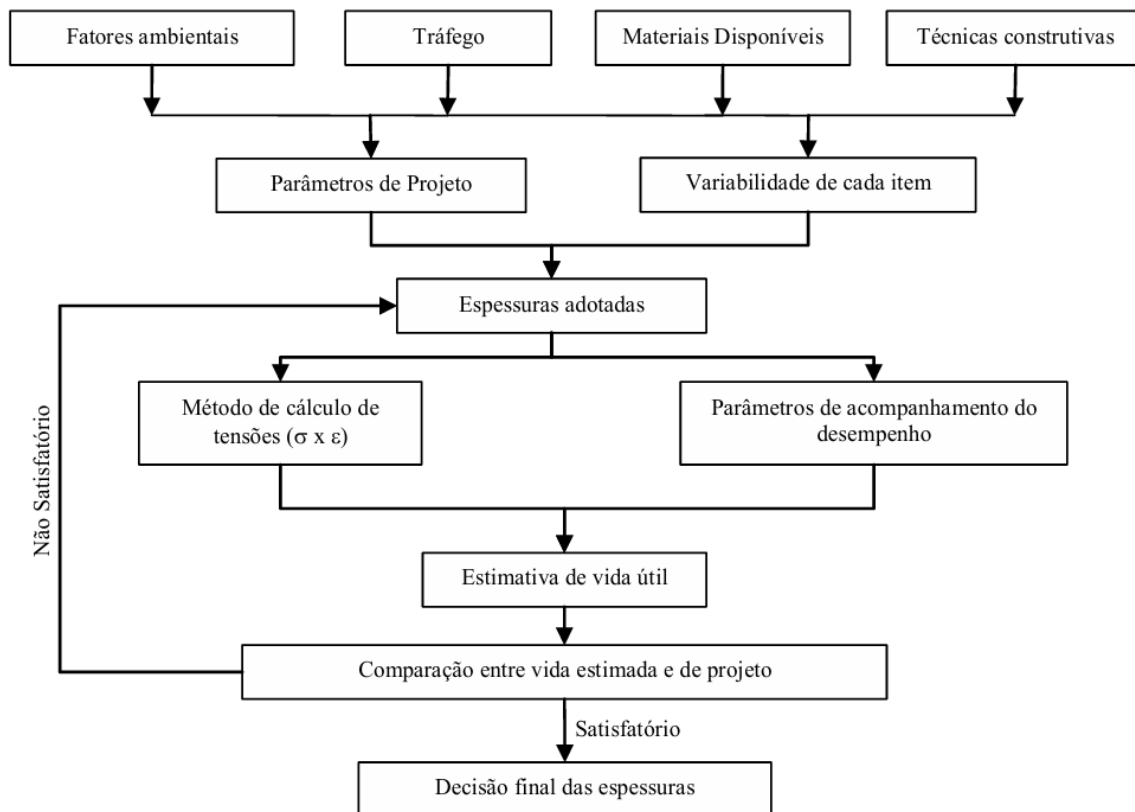


Figura 2.1. Esquema de um dimensionamento mecanístico de pavimentos (Medina & Motta, 2015)

A forma de calcular as tensões e deformações no pavimento de um método mecanístico-empírico pode ser variada, métodos computacionais, ou método analíticos usando teoria da elasticidade ou outra teoria mais pertinente ao material estudado.

Além de usar mecânica, os métodos mecanístico-empíricos necessitam de outras informações. Franco (2007) resumiu os passos básicos necessários na elaboração de um projeto que usa dimensionamento mecanístico-empírico:

- Reunir os dados referentes aos materiais de pavimentação, ao tráfego e às condições ambientais;
- Correlacionar os dados de resistência dos materiais e tráfego em função das épocas sazonais e o comportamento dos materiais em função do tipo de carregamento;

- Escolher as espessuras das camadas e calcular as tensões e deformações considerando as diversas correlações obtidas;
- Relacionar os valores críticos de tensões e deformações com os danos que a repetição das cargas pode causar ao pavimento por meio de modelos de previsão; e
- Verificar se as espessuras escolhidas satisfazem as condições impostas no dimensionamento.

O estudo dos materiais está entre as necessidades básicas no dimensionamento mecânico e de acordo com Huang (2003) a propriedade mais importante a ser considerada é o módulo de resiliência, pois relaciona o deslocamento nas camadas com a carga sendo aplicada sobre elas. Sendo assim, é gerado a necessidade de estudos laboratoriais para entender o funcionamento mecânico dos materiais e obter as características dos materiais que serão usados. O clima é outro fator importante para que o modelo estrutural funcione como esperado, assim como o tráfego deve ser estudado de forma minuciosa para que os valores de cargas solicitantes estejam sejam o mais próximo possível da realidade em campo. Sem esses dados de entrada de forma acurada o modelo mecânico estudado não corresponderá com o que acontece na realidade.

2.3 Comportamento de Materiais Viscoelásticos

A caracterização dos ligantes asfálticos visa compreender o seu comportamento viscoelástico, uma vez que as respostas mecânicas desses materiais fogem do escopo da elasticidade linear e da viscosidade pura, sendo altamente dependentes da temperatura, da frequência do tempo de carregamento e da magnitude da deformação aplicada (Olard et al., 2005, Mangiafico, 2014).

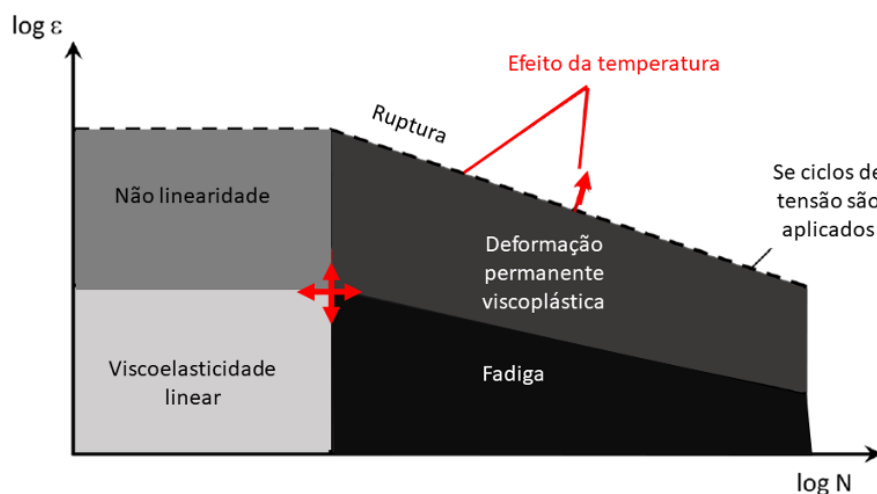


Figura 2.2. Comportamento mecânico de misturas asfálticas dependendo da deformação e número de ciclos, dada uma mesma temperatura (Nunes, 2022).

Os ligantes são classificados e avaliados por meio de ensaios empíricos padronizados que medem suas propriedades físicas básicas. Estes incluem testes de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional.

Além do material no estado virgem, o efeito do envelhecimento a curto prazo, simulando a volatilização, perda de massa e oxidação térmica durante a usinagem e a aplicação no campo, é rotineiramente avaliado por meio do ensaio RTFOT (Rolling Thin-Film Oven Test), nele o ligante é tipicamente exposto ao aquecimento contínuo sob a injeção de ar, aferindo o quanto o material ganha rigidez após esse processo.

A avaliação mecânica avançada utiliza o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR), equipamento que submete amostras cilíndricas posicionadas entre placas paralelas a carregamentos oscilatórios para determinar o torque e o ângulo de deflexão do material. O DSR afere propriedades essenciais em domínios viscoelásticos lineares e não lineares: Módulo Dinâmico de Cisalhamento ($|G^*|$) e Ângulo de Fase (δ). O módulo complexo quantifica a rigidez absoluta do ligante, e o ângulo de fase aponta a defasagem entre a tensão aplicada e a deformação de resposta. Para um material puramente elástico $\delta=0^\circ$, enquanto para um material puramente viscoso $\delta=90^\circ$ (Kim, 2009).

Com ensaios de varredura de múltiplas frequências e temperaturas, aplica-se o Princípio da Superposição Tempo-Temperatura utilizando modelos de ajuste matemático (como a função sigmoidal) para construir Curvas Mestras. Airey (1997) define a curva mestra como um combinado de várias curvas isotérmicas, que são deslocadas manualmente, para que a sua sobreposição resulte numa curva única a uma dada temperatura de referência. Estas curvas conseguem prever o comportamento de rigidez do ligante em toda a sua faixa térmica e de velocidades de tráfego de serviço, superando as limitações do ensaio em apenas uma condição.

Com dados do DSR é possível fazer a classificação por desempenho (PG) do ligante. Essa classificação avalia a adequação do ligante a temperaturas elevadas. O método utiliza o parâmetro $|G^*|/\sin(\delta)$ para garantir a rigidez mínima exigida sob condições climáticas de projeto.

Também é possível avaliação ensaio de *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR), ensaio que foi desenvolvido para avaliar a resistência à deformação permanente, podendo ser responsável pela patologia de afundamento da trilha de roda. A execução desse ensaio submete o ligante a dez ciclos de 1 segundo de fluência contínua e 9 segundos de recuperação sob diferentes níveis de tensão (0,1 kPa e 3,2 kPa). Ele mede a capacidade do ligante de recuperar

sua forma original, e a sua compliância não-recuperável (J_{nr}), que indica a deformação residual retida.

O ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS) consiste em um procedimento acelerado destinado à avaliação da resistência à fadiga. O material envelhecido é submetido a deformações cíclicas com amplitudes crescentes a uma frequência constante de 10 Hz, forçando um rápido acúmulo de danos mecânicos na amostra em cerca de 30 minutos. Os dados de rigidez em declínio são processados matematicamente pelo modelo termodinâmico S-VECD (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*). O modelo ajusta as curvas características de dano e obtém coeficientes de resistência próprios do material, permitindo prever a falha por fadiga de forma independente das condições de contorno testadas em laboratório.

2.4 Sucção

A sucção é um fator fundamental para o comportamento mecânico dos solos não saturados, sendo definida de forma simplificada como a pressão exercida pela água dentro dos poros que faz com que o solo absorva ou perca umidade em resposta às condições do ambiente (Marinho, 1994; Houston *et al.*, 1994). Essa propriedade é inversamente proporcional à quantidade de água, diminuindo conforme o grau de saturação do solo aumenta, até chegar a zero quando o material atinge 100% de saturação.

A sucção total de um solo é dividida em duas componentes: sucção matricial: relacionada à movimentação da água em estado líquido, sendo a parcela que sofre maior influência das mudanças climáticas; e sucção osmótica: decorrente da diferença de concentração de substâncias químicas presentes no solo.

A dinâmica que correlaciona a quantidade de água que o solo consegue reter com as variações de sucção é expressa graficamente por meio da Curva Característica Solo-Água (Vanapalli *et al.*, 1999; Fredlund *et al.* 1995). Para a aferição da sucção, destacam-se duas técnicas mais utilizadas, o método do papel filtro e os psicrômetros. No método do papel filtro estima-se a sucção baseando-se na transferência de umidade entre o solo e o papel filtro calibrado, até que ambos atinjam um estado de equilíbrio (Marinho, 1997). Nos equipamentos chamados psicrômetros, eles determinam a sucção total medindo o ponto de orvalho, ou seja, identificando o momento de condensação do vapor d'água dentro de uma câmara hermética contendo a amostra.

2.5 Efeitos da Umidade na Estrutura do Pavimento

O clima é um fator determinante para a durabilidade das rodovias. Enquanto o revestimento asfáltico sofre mais com as variações de temperatura, as camadas inferiores granulares são extremamente sensíveis a alterações na umidade.

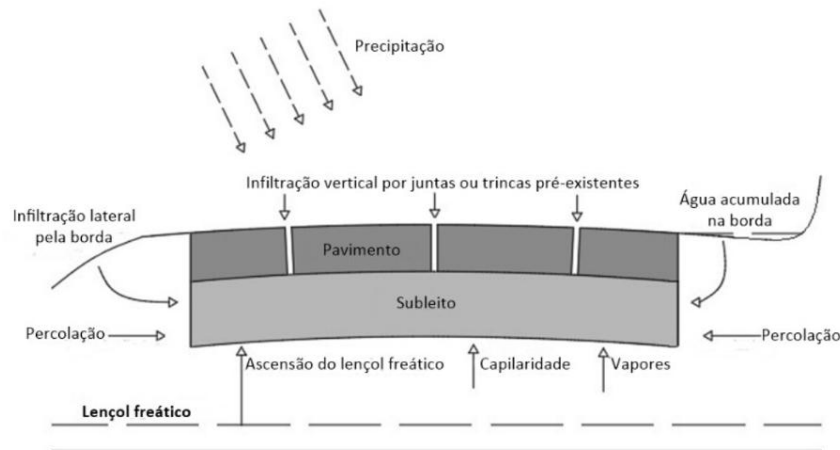


Figura 2.3. Origem da umidade na estrutura de pavimentos (Custódio *et al.*, 2021).

A água pode penetrar na estrutura do pavimento de várias formas: de cima para baixo pela infiltração de chuvas por trincas, defeitos no asfalto ou pelos acostamentos não pavimentados ou de baixo para cima pelas flutuações do lençol freático e ascensão por capilaridade (Medina, 1997). Quando isso ocorre, o acúmulo de umidade reduz drasticamente a rigidez das camadas granulares do pavimento, acelerando a degradação da via.

Como afirmam Nogami e Villibor (1995), no contexto brasileiro, caracterizado pelo clima tropical, essa dinâmica exige um olhar cuidadoso, uma vez que os nossos solos tropicais reagem à umidade de maneira muito particular, os métodos de dimensionamento estrangeiros, feitos para climas temperados, precisam ser adaptados para a nossa realidade.

Por fim, os projetos devem considerar que, após construído, o solo do subleito passará por uma fase de adaptação até atingir uma a chamada umidade de equilíbrio, caracterizado por um estado de balanço dinâmico ditado pela interação contínua entre a água do ambiente, as condições climáticas e a estrutura do pavimento (Medina & Motta, 2015).

2.6 Propriedades Mecânicas de Materiais de Pavimentação

Devido à natureza viscoelástica do ligante asfáltico, revestimento flexíveis não respondem da mesma forma a carregamentos estáticos e a carregamento dinâmicos, uma vez que a velocidade

de carregamento é um fator importante em materiais viscosos. Todavia, as misturas asfálticas podem ser consideradas elásticas se a carga aplicada for pequena em relação à resistência (tensão de ruptura) do material, e o carregamento for repetido por ciclos suficientemente longos (Huang, 1993). Isso é de grande importância por permite caracterizar o material devido a sua rigidez e, como afirma Franco (2007), por meio da teoria da elasticidade, a estrutura de um pavimento asfáltico pode ser representada como um meio estratificado, sujeito a cargas superficiais distribuídas em uma área circular.

2.6.1 Resiliência

Apesar de no Brasil ainda serem usados métodos de dimensionamento baseado em resistência a penetração, estudos sobre a rigidez de materiais asfálticos não são novidade. Medina & Motta (2015) afirmam que Hveem iniciou os estudos nessa área, afirmando que o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos se devia à deformação resiliente das camadas subjacentes. Hveem foi o primeiro a adotar o termo deformação resiliência definindo-a como energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. O nome resiliência foi escolhido ao invés de elástica, pois as deformações nos pavimentos são muito maiores que as deformações em materiais elásticos.

2.6.2 Ensaios de Cargas Repetidas

Devido a própria definição de resiliência como energia armazenada somente enquanto há tensão aplicada, ensaios para entendimento deste fenômeno não podem ser estáticos. Foi assim que nasceram os ensaios cíclicos para aferição do Módulo de Resiliência, que pode ser definido como a relação entre a deformação elástica e a tensão aplicada no corpo de prova.

Usualmente, se utiliza o ensaio de compressão diametral para aferir do módulo de resiliência. Este ensaio foi aplicado por Schmidt (1972) e vem sendo cada vez mais difundido.

O módulo de resiliência de misturas asfálticas a quente varia com: o tipo de mistura (CA, SMA, CPA, etc), a faixa granulométrica, o tipo de ligante asfáltico, as propriedades volumétricas, a energia de compactação, com a temperatura de compactação, com a temperatura de ensaio entre outras variáveis com valores típicos na faixa de 2.000 a 12.000 MPa para CAs a 25 °C (Bernucci, *et al.*, 2022).

2.6.3 Ensaio de Vida de Fadiga

Bernucci, *et al.* (2022) relata que cargas cíclicas produzem falhas nos materiais decorrentes das solicitações de tensões mais baixas do que a resistência (tensão obtida na ruptura em ensaios estáticos), como consequência dessa carga ser aplicada repetidas vezes. Esse fenômeno é chamado fadiga e é definido como (ASTM, 1979): “o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos”.

Esse fenômeno nos pavimentos se dá pela repetição das cargas das rodas dos veículos solicita à flexão a camada de concreto asfáltico do revestimento betuminoso, que se propaga para cima até atingir a superfície (Medina & Motta, 2015).

Em laboratório, o ensaio mais usual de vida de fadiga é feito por compressão diametral à tensão controlada (aplica-se sempre uma mesma tensão e mede-se o deslocamento), e, então, o número de repetições de carga até a falha é encontrado, sendo a carga aplicada numa frequência de 1 Hz (0,1s de aplicação e 0,9s de repouso) por equipamento pneumático.

2.7 Segmento Experimental

O segmento experimental aqui estudado já foi foco de outros trabalhos que aqui serão comentados, também será tratado sobre informações geográficas da região.

2.7.1 Clima da Região

O estado de Roraima apresenta condições climáticas típicas da região amazônica, com predomínio de climas tropicais úmidos e forte influência da sua posição geográfica próxima à linha do Equador.

As temperaturas médias anuais são elevadas e apresentam baixa amplitude térmica ao longo do ano, sendo que as temperaturas médias mensais variam de aproximadamente entre 27 °C e 29 °C (Araújo, *et al.*, 2024). Em termos médios, a região apresenta um ambiente termicamente estável, porém com condições favoráveis à degradação de materiais asfálticos por envelhecimento acelerado.

A precipitação pluviométrica é um dos elementos climáticos mais relevantes para a análise de desempenho de pavimentos na região. Os índices anuais apresentam aproximadamente 1700

mm (Araújo, *et al.*, 2024), podendo ultrapassar esse valor em algumas áreas. A distribuição das chuvas é sazonal, com um período chuvoso concentrado entre os meses de abril e setembro, e uma estação seca relativa entre outubro e março. Os longos períodos chuvosos contribuem para a saturação dos solos, especialmente em áreas com drenagem deficiente.

Para os pavimentos da região, essas características climáticas exercem influência direta no desempenho e na durabilidade das estruturas. Altas temperaturas favorecem o amolecimento do ligante asfáltico, aumentando a suscetibilidade à deformação permanente, e a elevada pluviosidade contribui para processos de infiltração, redução no desempenho da camada de subleito. Dessa forma, o dimensionamento e a seleção de materiais para pavimentação em Roraima devem considerar critérios específicos de resistência à umidade, eficiência do sistema de drenagem e estabilidade térmica dos ligantes.

2.7.2 Caracterização dos Materiais de Subleito, Sub-base e Base

Caetano (2024) caracterizou o material de subleito, sub-base e base usados nos segmentos experimentais, realizando ensaios de densidade real dos solos, análise granulométrica, classificação MCT, índice de suporte Califórnia, deformação permanente e módulo de resiliência.

A camada de base é composta por cascalho laterítico com adição de 35% de areia comercial. É um solo classificado como Laterítico Arenoso (LA') que obteve um Módulo de Resiliência (MR) elevado (421 MPa) na sua condição de máxima densidade e um CBR (ou Índice de Suporte Califórnia - ISC) máximo de 92,3%. Apesar da boa rigidez, apresentou elevada deformabilidade plástica inicial, e tendeu à acomodação plástica após os primeiros ciclos de carregamento.

A camada de sub-base é formada por cascalho laterítico amarelo. Classificado como Não Laterítico Siltoso (NS'), este material apresentou um MR inferior (190 MPa) ao da base e um CBR de 30,87%. Por outro lado, destacou-se por ter baixa deformabilidade plástica, apresentando um comportamento de escoamento e acomodação controlada.

E, por fim, a camada de subleito (SL-SE) é composto por uma argila arenosa. Classificado como Não Laterítico Arenoso (NA'), obteve um MR de 181 MPa na densidade máxima e um CBR de 12,3%. Assim como a camada de base, demonstrou elevada deformabilidade, com escoamento plástico nas tensões maiores e acomodação nas tensões menores.

Os dados dos ensaios mecânicos nos materiais da camada granulares demonstram uma forte dependência da tensão de confinamento para o ganho de rigidez (MR). Isso também provoca altas deformações permanentes iniciais (notadamente na base e no subleito) antes que o material consiga atingir a estabilização no pavimento.

Por fim, Caetano (2024) conclui que é incontestável que muitas das abordagens tradicionalmente empregadas no Brasil para o dimensionamento de pavimentos estão desatualizadas e carecem da devida adequação ao cenário local, principalmente devido às particularidades do clima e das características pedológicas regionais.

2.7.3 Relação entre Módulo de Resiliência e Sucção no Subleito.

Cardoso (2024) estudou o solo de subleito usado no segmento experimental por meio dos diferentes tipos de ensaio. O material do subleito foi coletado sofreu uma estabilização granulométrica com a adição de 35% de areia comercial para elevar o seu Índice de Suporte Califórnia (CBR) para cerca de 12,26%.

O solo passou por caracterização microestrutural (Microscopia Eletrônica - MEV, Difração de Raios-X e ataque sulfúrico) e macroestrutural (granulometria, densidade). Em seguida, foram moldados corpos de prova em 5 teores de umidade diferentes: 2% acima da ótima, 1% acima da ótima, umidade ótima, 1% abaixo da ótima e 2% abaixo da ótima, para avaliar a curva característica e o comportamento sob cargas dinâmicas. Ademais, para todas as umidades diferentes da ótima os corpos de prova foram moldados de duas formas diferentes: com variação na quantidade de água para compactação e com molhagem e secagem dos corpos de prova pós-compactação, com o objetivo de simular a má execução da camada e a variação do nível do lençol freático ao longo do tempo, respectivamente.

Os resultados apresentaram um solo que foi classificado como Não Laterítico Arenoso (NA') e é composto por aproximadamente 80% de areia devido à mistura feita em campo. Apresentou alto grau de intemperismo e a presença exclusiva do mineral goethita, que lhe confere alta estabilidade e resistência.

No ensaio de módulo de resiliência foi observado um ganho de rigidez do solo de Roraima fortemente dependente da tensão confinante, o que é justificado pela sua matriz predominantemente arenosa.

O módulo de resiliência demonstrou ser extremamente sensível à umidade: no ramo seco (-2% da umidade ótima), o MR aumentou drasticamente, em mais de 167%, por outro lado, o umedecimento reduziu severamente sua rigidez.

Quando compactado ou umedecido acima da umidade ótima, as deformações plásticas subiram. Apesar das altas deformações no estado úmido, a presença de areia permitiu que ele suportasse a carga final dos ensaios sem romper por cisalhamento.

Cardoso (2024) conclui que a adição de 35% de areia mudou drasticamente a natureza do solo de Roraima, diminuindo a superfície específica das partículas e tornando o seu comportamento mecânico muito semelhante ao de materiais granulares puros (alta dependência de confinamento para ter rigidez).

Embora seja um material adequado para o subleito, ele exige um controle tecnológico rigoroso durante a obra. Compactar a camada ou permitir que ela sature com água acima da umidade ótima fará com que o pavimento perca suporte estrutural e sofra elevadas deformações, acelerando a degradação da rodovia

2.8 Método do Dimensionamento Nacional (MeDiNa)

Com o aumento no uso de métodos mecanístico-empíricos no país houve a necessidade de padronização do dimensionamento, como o objetivo de facilitar a fiscalização e disseminar ainda mais a utilização do método. E então foi desenvolvido o programa MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional) em uma parceria do DNIT com a COPPE-UFRJ, baseado no *software* SISPAV de autoria de Franco (2007).

O MeDiNa foi programado se pautando nos estudos de elasticidade linear em sistemas de multicamadas com diferentes materiais e contínuos, e segundo Motta e Franco (2020) as hipóteses do programa são:

- os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos (a modelagem elástica não linear é feita por iterações elásticas lineares);
- a lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- as camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;

- a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

A implantação do MeDiNa traz vantagens para o sistema rodoviário brasileiro por disponibilizar um *software* gratuito, de fácil uso e que analisa todas as camadas do pavimento levando em consideração os comportamentos mecânicos dos materiais, promovendo uma maior confiabilidade nos projetos de dimensionamento que forem verificados pelo programa. Assim, se torna mais fácil a escolha do pavimento baseado em critérios técnicos e econômicos, resultando em pavimentos com o tempo de vida útil igual ao planejado, o que acarreta um custo menor na manutenção das rodovias brasileiras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo detalha o local estudado, quais materiais foram utilizados durante a pesquisa, apresenta o programa experimental seguido para este estudo e relata a metodologia das análises computacionais dos pavimentos realizadas a partir dos dados obtidos experimentalmente.

Para a realização dos ensaios foram usados o Laboratório de Análises de Asfalto e Concreto do Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER/DF) e o Laboratório de Infraestrutura da Universidade de Brasília (Infralab-UnB).

3.1 Caracterização da Área de Estudo

A presente pesquisa propõe-se a realizar análises físicas e mecânicas dos materiais da camada de revestimento do Segmento Experimental construído no âmbito do programa PRO-MeDiNa, localizado na BR-432/RR, no município de Cantá, a aproximadamente 62 km de Boa Vista, capital do estado de Roraima (Figura 3.1). A região apresenta características climáticas e geotécnicas particulares, incluindo elevada pluviosidade sazonal e variações do nível do lençol freático, fatores que influenciam diretamente o desempenho do pavimento.



Figura 3.1. Mapa de Localização do SE na BR-432/RR. (Fonte: adaptado do Google)

3.2 Metodologia

A investigação será conduzida por meio de abordagem experimental e computacional. Na etapa experimental, serão realizados ensaios laboratoriais para caracterização física, mecânica e reológica dos materiais do revestimento asfáltico. Na etapa computacional, serão efetuadas simulações no software MeDiNa, considerando diferentes configurações geométricas das camadas e distintos parâmetros de material, a fim de avaliar a sensibilidade da resposta estrutural.

Estudos anteriores realizados no mesmo Segmento Experimental contribuíram para a caracterização das camadas granulares e do subleito. Caetano (2024) conduziu análises físicas e mecânicas dos materiais granulares, incluindo ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente. Complementarmente, Cardoso (2024) investigou a influência da variação da umidade na camada de subleito, considerando as oscilações do nível do lençol freático durante o período chuvoso, por meio de ensaios hidromecânicos, módulo de resiliência e deformação permanente.

3.3 Materiais Estudados

Todos os materiais utilizados nos ensaios desta pesquisa são provenientes da obra de pavimentação do segmento experimental (SE) realizado como parte do programa PRO-MeDiNa do DNIT localizado na BR-432/RR, no município de Cantá, a 62 km de Boa Vista, capital do estado, executado no ano de 2021.

Durante a execução da mistura de concreto asfáltico para ser usada na camada de revestimento do SE foram coletadas amostras dos agregados e do ligante asfáltico. Tais amostras serão o objeto de estudo da presente pesquisa.

Ademais, após a finalização das obras de pavimentação do SE, foram retiradas placas de aproximadamente 50 cm x 25 cm da camada de revestimento, com a finalidade de controle tecnológico da execução do projeto de pavimentação. Sabe-se que a mistura usada se encaixa na Faixa B-19 do DNIT (DNIT, 2024a) e é composta por CAP 50/70.

3.4 Programa Experimental

A Figura 3.2 apresenta o fluxograma com o planejamento e a organização das atividades de cada etapa da pesquisa.

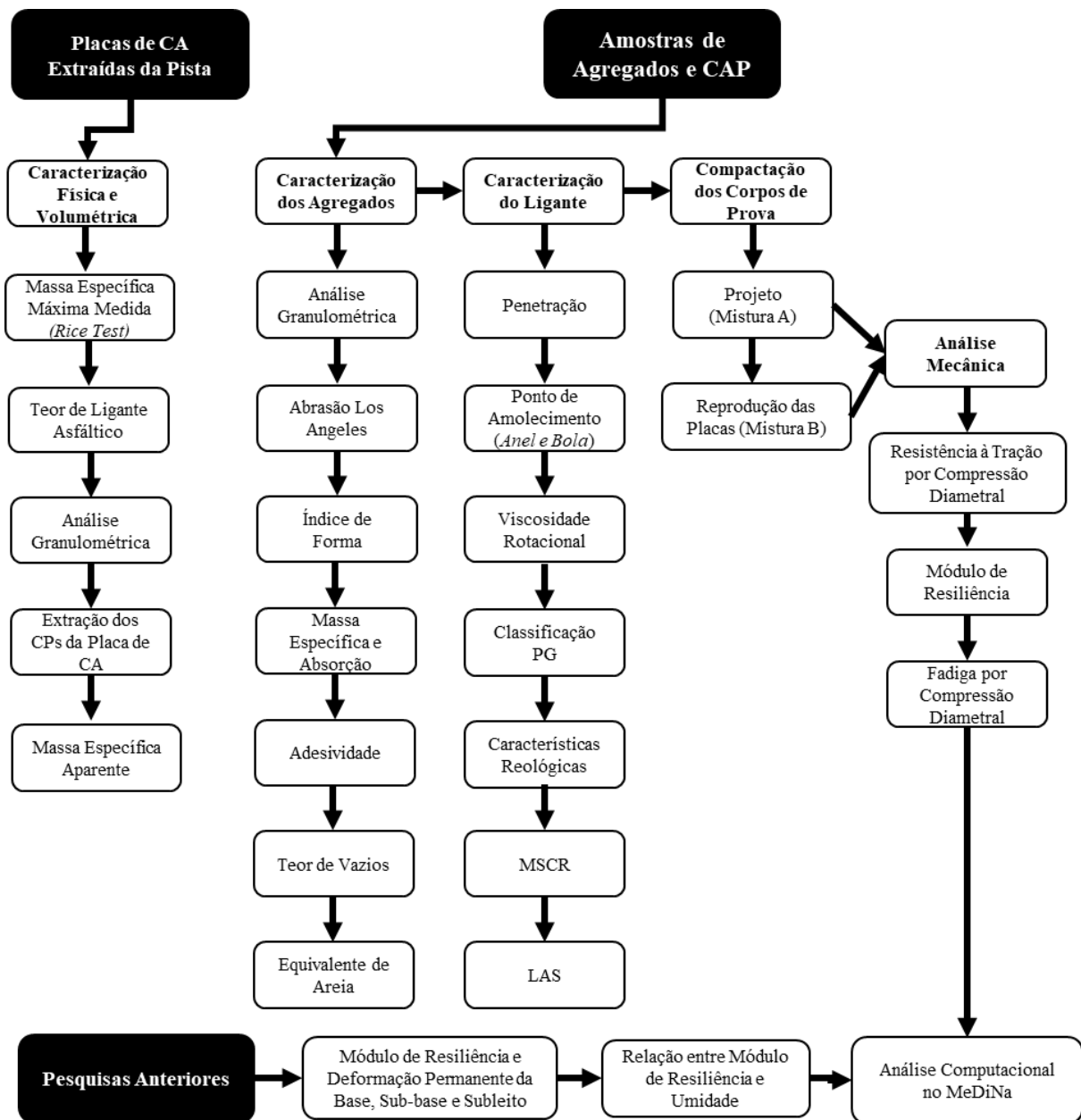


Figura 3.2. Fluxograma de Organização da Pesquisa. (Fonte: Autor).

3.5 Coleta das Amostras

Com autorização do DNIT, o órgão responsável pelo Segmento Experimental, amostras de todas as camadas do pavimento foram coletadas e catalogadas.

Para o revestimento asfáltico, em específico, foram selecionadas e separadas, antes da mistura dos materiais, amostras de todas as frações de agregados: areia, brita 1, brita 0 e pó de pedra, além do ligante asfáltico: CAP 50/70. A coleta dos agregados foi feita seguindo o proposto pela norma DNER-PRO 120 (DNER, 1997), garantindo uma boa representatividade.

Após a construção dos segmentos experimentais, foram extraídas 6 placas do revestimento asfáltico em 3 posições diferentes. A coleta, organização, identificação e envio de Roraima para o Distrito Federal foi realizado pela equipe do Laboratório de Engenharia do Ministério Público de Contas do estado de Roraima (MPC/RR). Na Figura 3.3 estão apresentadas as posições da amostragem no segmento, assim como as espessuras das camadas nos pavimentos.

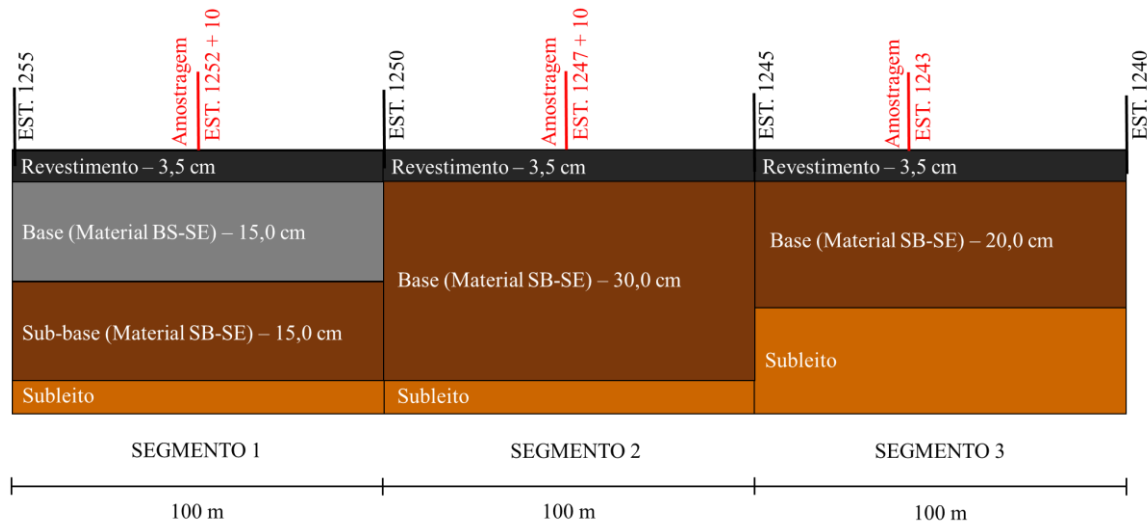


Figura 3.3. Geometria do Segmento Experimental estudado. (Fonte: Autor).

A Figura 3.4 mostra as placas de concreto asfáltico (CA) extraídas do pavimento.



Figura 3.4. Placas de Concreto Asfáltico (CA) extraídas do revestimento dos SE. (Fonte: Autor)

3.6 Caracterização da Camada de Revestimento dos Segmentos Experimentais

Para se obter os dados para reproduzir a mistura em laboratório e estudar a camada de revestimento do SE, as placas de CA foram preparadas para a caracterização física e volumétrica. Para tal, elas foram limpas e aquecidas até a trabalhabilidade para que suas

partículas fossem separadas. E no caso do ensaio de massa específica aparente foi usada uma broca para extrair os CP das placas. A Figura 3.5 apresenta esse processo de extração dos CP para placa da estaca 1252+10 para o ensaio de Densidade Máxima Medida.



Figura 3.5. Extração de CP com a broca. (Fonte: Autor)

A Tabela 3.1 apresenta os ensaios realizados nessa amostra e as respectivas normativas seguidas.

Tabela 3.1. Normas usadas nos ensaios de caracterização das placas de CA.

ENSAIO	NORMA
Densidade Máxima Medida (<i>Rice Test</i>)	DNIT 427/2020 – ME
Teor de Ligante pelo Método da Ignição	AASHTO T 308-10
Análise Granulométrica por Peneiramento	DNIT 412/2025 – ME
Massa Específica Aparente	DNIT 428/2022 – ME

3.6.1 Densidade Máxima Medida (Rice Test)

A densidade máxima medida da mistura asfáltica foi determinada pelo método Rice, conforme a norma DNIT 427/2020-ME (DNIT, 2020). Inicialmente, uma amostra da mistura foi pesada em condição seca e posteriormente submergida em água e submetida à vácuo enquanto presa numa mesa giratório para que ocorresse a saída do ar aprisionado. Após 15 minutos de vácuo, foram realizadas as pesagens necessárias para o cálculo da massa específica máxima da mistura.

A densidade máxima teórica foi obtida pela relação entre a massa seca da mistura e o volume deslocado no picnômetro, conforme determinado em norma.

3.6.1 Teor de Ligante pelo Método da Ignição

O teor de ligante asfáltico foi determinado pelo método da ignição, conforme AASHTO T 308 (AASHTO, 2008). O ensaio foi realizado no forno automático da *Controls*. Inicialmente, a amostra da mistura asfáltica foi pesada e colocada em um forno de ignição, onde foi submetida temperatura de 538 °C até que ocorresse a queima do ligante asfáltico. Após a combustão completa, o material mineral remanescente foi novamente pesado.



Figura 3.6. Forno usado para queimar o asfalto das misturas estudadas.

O teor de ligante foi calculado a partir da diferença entre a massa inicial da mistura e a massa final dos agregados

3.6.2 Análise Granulométrica por Peneiramento

A distribuição granulométrica dos agregados foi determinada por peneiramento, conforme a norma DNIT 412/2025-ME (DNIT, 2025). A amostra previamente seca foi submetida a uma

série de peneiras, dispostas em ordem decrescente de tamanho. O conjunto foi submetido à agitação mecânica e, posteriormente, foi determinada a massa retida em cada peneira.

3.6.3 Massa Específica Aparente

A massa específica aparente das amostras extraídas foi determinada conforme a norma DNIT 428/2022-ME (DNIT, 2022b). Inicialmente, os corpos de prova foram pesados em condição seca, depois com auxílio de balança hidrostática foram pesados imersos em água, e por fim, foram pesados na condição saturado superfície seco. A massa específica aparente foi calculada com base na relação entre a massa seca do corpo de prova e o volume determinado pelo princípio de Arquimedes, conforme equação especificada em norma.

Com esses dados foi possível fazer um controle tecnológico da execução da camada de revestimento dos SE e comparar com o projeto original.

3.7 Caracterização do Agregado Mineral

Para o melhor entendimento do material proveniente de Roraima, e adquirir dados para um novo estudo de dosagem, os agregados terão seus aspectos físicos, químicos e volumétricos caracterizados. Os ensaios realizados são os elencados na IS-247 (DNIT, 2021), e estão presentes na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Normas usadas nos ensaios de caracterização do agregado mineral.

ENSAIO	NORMA
Análise Granulométrica por Peneiramento	DNIT 412/2025 – ME
Abrasão Los Angeles	DNIT 451/2024 – ME
Índice de Forma	DNIT 424/2020 – ME
Massa Específica e Absorção do Agregado Graúdo	DNIT 413/2021 – ME
Massa Específica e Absorção do Agregado Miúdo	DNIT 411/2021 – ME
Adesividade	DNIT 452/2024 – ME
Teor de Vazios	DNIT 415/2019 - ME
Equivalente de Areia	DNIT 450/2024 – ME

Esses ensaios serão realizados em todas as frações de agregados (brita 0, brita 1, pó de pedra e areia).

3.7.1 Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado para avaliar a resistência do agregado ao desgaste por abrasão e impacto, e é regido pela norma DNIT 451/2024 – ME (DNIT, 2024b). Foram realizados ensaios nas duas amostras de agregado graúdo, brita 1 com graduação C e brita 0 com graduação D. O material foi colocado no tambor da máquina Los Angeles juntamente com uma carga de 8 e 6 esferas de aço, para graduação C e D, respectivamente. O tambor foi submetido a 500 rotações, promovendo a fragmentação do agregado por impacto e atrito.

Após o ensaio, o material foi retirado do tambor e peneirado na peneira de 1,7 mm. Determinou-se então a massa do material retido na peneira. A perda por abrasão foi calculada como determinado em norma.

3.7.2 Índice de Forma

O ensaio de índice de forma foi realizado com o objetivo de avaliar a proporção de partículas lamelares ou alongadas presentes no agregado. Feito também tanto para a brita 0, quanto para brita 1, seguindo o proposto pela norma DNIT 424/2020 – ME (DNIT, 2020b), inicialmente as amostras são peneiradas em peneiras de fundo redondo, e então as amostras retidas nessas peneiras passam pelo crivo.



Figura 3.7. Uso do crivo para execução do ensaio de índice de forma.

3.7.3 Massa Específica e Absorção do Agregado Graúdo

O ensaio foi realizado para determinar a massa específica e a absorção do agregado graúdo. Também foi realizado tanto para brita 1 quanto para brita 0. Para este ensaio seguiu-se o determinado em DNIT 413/2021 – ME (DNIT 2021b). Inicialmente, a amostra foi lavada e mantida imersa em água por um período de 72 horas.

Após esse período, a amostra foi seca superficialmente até atingir a condição saturada superfície seca, sendo então determinada a massa nessa condição. Em seguida, com auxílio da balança hidrostática foi determinada a massa da amostra submersa em água. Então a amostra foi levada a estufa onde ficou por 24h e teve sua massa aferida novamente.



Figura 3.8. Agregados de brita 0 submersos pra o ensaio de massa específica.

3.7.4 Massa Específica e Absorção do Agregado Miúdo

Este ensaio segue o descrito na norma DNIT 412/2021 – ME (DNIT, 2021c). Para o agregado miúdo, o ensaio foi realizado utilizando picnômetro. Para este ensaio foram feitas amostras na areia e no pó de pedra. Inicialmente, a amostra foi saturada em água por 24 horas. Posteriormente, o material foi levado à condição saturada superfície seca com o teste do tronco de conte (Figura 3.9 e Figura 3.10).



Figura 3.9. Teste na areia para confirmar se o agregado chegou a condição de superfície saturado seca.



Figura 3.10. Pó de pedra na condição superfície saturada seca.

Da amostra saturada superfície seca foi separado 500 g que foram pesadas e introduzidas no picnômetro, que foi preenchido com água até o volume padrão. Determinou-se a massa do conjunto e, posteriormente, a massa do picnômetro apenas com água.

3.7.5 Adesividade

O ensaio de adesividade foi realizado para avaliar a afinidade entre o ligante asfáltico e o agregado, para tal é necessário seguir o determinado na norma DNIT 452/2024 – ME (DNIT, 2024c). Inicialmente, os agregados foram aquecidos e misturados com o ligante asfáltico aquecido até garantir o recobrimento completo das partículas.

Após o resfriamento da mistura, as partículas foram submetidas à imersão em água por um período de 72 horas na estufa a 40 °C. Após esse período foi feita avaliação visual para atestar se houve deslocamento do filme asfáltico.

3.7.6 Teor de Vazios

O teor de vazios do agregado miúdo foi feito tanto no pó de pedra, quanto na areia. O ensaio foi feito seguindo a norma DNIT 415/2019 – ME (DNIT, 2019), pelo método C, que usado toda a amostra menos os grãos que passam na 0,075 mm. O teor de vazios é determinado a partir da massa do material que preenche um cilindro de volume conhecido. Essa característica é frequentemente ligada a angularidade do agregado miúdo, uma vez que o ensaio é feito pela queda das partículas de uma determinada altura dentro do recipiente de volume conhecido, e partículas angulares tem mais dificuldade de se encaixar nesse caso.



Figura 3.11. Execução do ensaio de teor de finos na areia estudada.

Após a queda da amostra no recipiente foi pesado a quantidade de agregado que caiu dentro do recipiente, assim como foi aferido o seu volume preenchendo-o de água e pesando.

3.7.7 Equivalente de Areia

O ensaio de equivalente de areia foi realizado para avaliar a proporção de materiais finos indesejáveis presentes no agregado miúdo. Ele foi realizado na areia e no pó de pedra, e foi feito seguindo o proposto pela norma DNIT 450/2024 – ME (DNIT, 2024d). Inicialmente, uma amostra do material foi colocada em um cilindro graduado contendo solução flocculante.

O conjunto foi agitado para promover a dispersão das partículas. Após a agitação, o material foi deixado em repouso para permitir a sedimentação das partículas de areia e a suspensão das partículas argilosas.



Figura 3.12. Realização do ensaio de equivalente de areia.

Após o período de sedimentação, foram realizadas leituras das alturas da coluna de areia e da suspensão total.

3.8 Caracterização do Ligante

Também com o objetivo de adquirir informações para o projeto de dosagem, o Cimento Asfáltico de Petróleo do tipo 50/70 será ensaio e analisado para verificar suas condições físicas. Na Tabela 3.3 é estão listadas as normas a serem usadas.

Tabela 3.3. Normas usadas nos ensaios de caracterização do ligante asfáltico.

ENSAIO	NORMA
Viscosidade Rotacional	NBR 15184:2021
Ponto de Amolecimento	DNIT 131/2010 – ME
Penetração	DNIT 155/2010 – ME

Propriedades Reológicas	DNIT 448/2024 – ME
MSCR	AASHTO TP 70
RTFOT	NBR 15235:2009

3.8.1 Viscosidade Rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional foi realizado para determinar a resistência ao escoamento do ligante asfáltico em diferentes temperaturas. Esse ensaio é feito seguindo o proposto na norma NBR 15184:2021 (ANBT, 2021), no viscosímetro *Brookefield* da *Fungilab*. Inicialmente, o ligante foi aquecido até atingir a temperatura de 135°C. Em seguida, a amostra foi colocada no recipiente do viscosímetro rotacional e mantida em equilíbrio térmico.



Figura 3.13. Viscosímetro *Brookefield* utilizado para aferir a viscosidade rotacional.

Um spindle padronizado SP21 foi então inserido na amostra e colocado em rotação a uma velocidade constante. É observado o torque necessário para manter o spindle girando com a velocidade escolhida. Após essa primeira leitura, aumentou-se a temperatura para 155 °C e mais uma vez foi esperado o equilíbrio térmico. Após aguardar esse equilíbrio, mediu-se novamente o torque necessário para manter o spindle girando e com esse dado e mãos aumentou-se a

velocidade novamente, agora para 177 °C. Após o equilíbrio térmico, aferiu-se pela última vez o torque feito pelo motor para manter o spindle girando.

3.8.2 Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento foi determinado pelo método do anel e bola, com o objetivo de identificar a temperatura na qual o ligante apresenta amolecimento significativo. Esse ensaio foi feito seguindo o proposto em DNIT 131/2010 – ME (DNIT, 2010a) no equipamento de Anel e Bola Automático da Matest. Inicialmente, o ligante aquecido foi vertido em anéis metálicos padronizados e resfriado até atingir a forma sólida.



Figura 3.14. Equipamento de anel e bola automático usado no ensaio.

Após a preparação, os anéis contendo o ligante foram submergidos em água fria a 4°C e uma esfera metálica foi colocada sobre cada amostra, que foi aquecida gradualmente a uma taxa de 5 °C por minuto.

Durante o aquecimento, registrou-se a temperatura quando o ligante amolecido permitiu que a esfera se deslocasse e tocasse a placa inferior do equipamento. Essa temperatura foi considerada o ponto de amolecimento do ligante.

3.8.3 Penetração

O ensaio de penetração foi realizado para determinar a consistência do ligante asfáltico. Ele segue o procedimento descrito em DNIT 155/2010 – ME (DNIT, 2010b). O ensaio foi feito em um penetrômetro automático da *IPC Global-Controls*.

Inicialmente, o ligante foi aquecido e moldado em uma cápsula, sendo posteriormente resfriado e condicionado em banho termostático a 25 °C. Uma agulha padronizada foi posicionada sobre a superfície da amostra e liberada para penetrar no ligante durante 5 segundos sob uma carga total de 100 g.



Figura 3.15. Equipamento de penetração automático da *IPC Global-Controls*.

A profundidade de penetração foi medida em décimos de milímetro e a agulha foi solta mais duas vezes para se obter a média de penetração.

3.8.4 Propriedades Reológicas

As propriedades reológicas do ligante foram determinadas utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) da marca *Anton Paar*. E seguindo o proposto pela norma DNIT 448/2024 (DNIT, 2024e).



Figura 3.16. Reômetro de cisalhamento dinâmico usado na pesquisa.

A início dessa caracterização começou com a separação de uma pequena quantidade de ligante asfáltico em fôrmas de borracha, como visto na Figura 3.17.

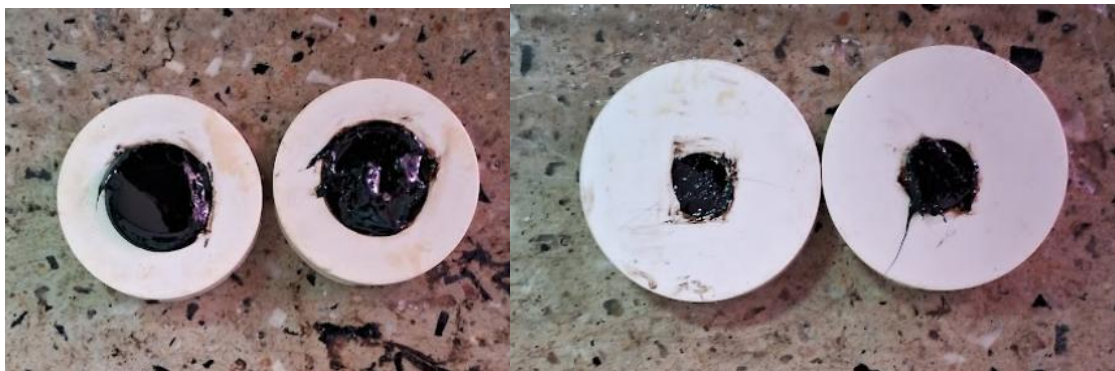


Figura 3.17. Formas para quantidade correta de ligante asfáltico a ser utilizado no reômetro.

O reômetro funciona com duas placas paralelas que giram entre si e cisalham a amostra, a Figura 3.17 apresenta dois tipos de amostra pois para temperaturas abaixo de 40 °C recomenda-se usar placas de 8 mm de diâmetro no reômetro e para temperatura acima de 40 °C, usa-se placas de 25 mm (Figura 3.19).



Figura 3.18. Placas de 25 mm e de 8 mm usadas no reômetro da *Anton Paar*.

Para iniciar os ensaios aqueceu-se previamente as placas até 40 °C para facilitar a saída da amostra da forma sem maiores problemas.

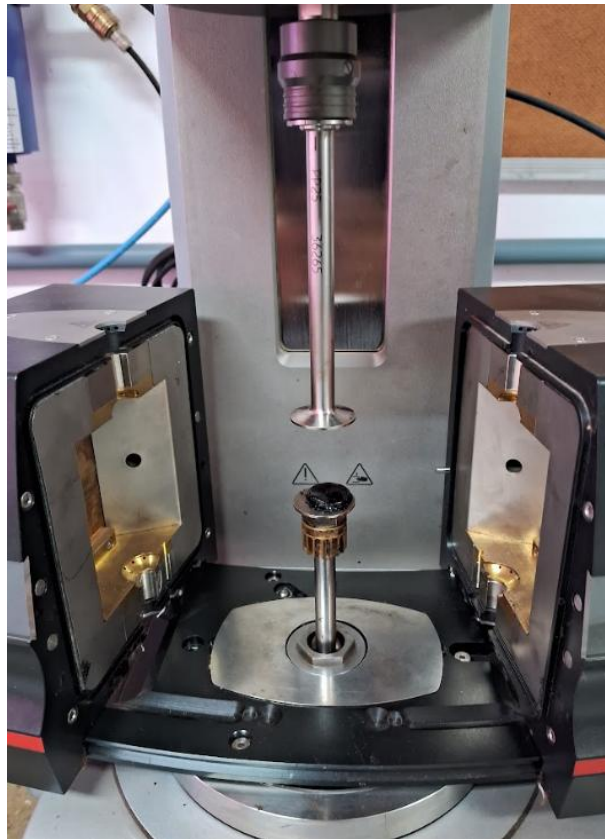


Figura 3.19. Amostra recém inserida no reômetro.

Após a inserção da amostra, o que se seguiu foi a averiguação da linearidade do ligante asfáltico, que é simplesmente ensaiar a amostra a diferentes níveis de deformação e diferentes temperaturas, para determinar até quais níveis de deformação o ligante se comporta de forma linear.

Com esse limite em mente, foi escolhido uma deformação (dentro do limite linear) e em seguida foi feito o ensaio na amostra à diferentes temperaturas e diferentes frequências de carregamento para determinar as características reológicas módulo complexo ($|G^*|$) e ângulo de fase (δ) em uma amplitude variada de casos.

O módulo complexo foi obtido pela relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a deformação resultante, o que pode ser aferido na Eq. 3.1.

$$|G^*| = \frac{\tau}{\gamma} \quad (Eq. 3.1)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento e γ é a deformação de cisalhamento.

O ângulo de fase representa o atraso entre tensão e deformação, indicando o comportamento viscoelástico do ligante.

3.8.5 MSCR – Multiple Stress Creep and Recovery

O ensaio MSCR foi realizado no reômetro de cisalhamento dinâmico para avaliar a susceptibilidade à deformação permanente do ligante asfáltico. Esse ensaio segue a AASHTO TP 70 (AASHTO, 2013). Inicialmente, a amostra foi posicionada entre as placas do DSR e condicionada a temperaturas de ensaio de 40 °C a 70 °C. Para esse ensaio foram feitos ensaios de 6 em 6 °C.

Foram aplicados ciclos sucessivos de carregamento e recuperação. Cada ciclo consistiu em 1 segundo de aplicação de tensão constante seguido de 9 segundos de recuperação sem carga.

Os ensaios foram realizados sob dois níveis de tensão, 0,1 kPa e 3,2 kPa. Durante cada ciclo foram registradas as deformações acumuladas e recuperáveis.

A compliância não recuperável foi determinada pela Eq. 3.2.

$$J_{nr} = \frac{\gamma_{nr}}{\tau} \quad (Eq. 3.2)$$

onde γ_{nr} é a deformação não recuperável e τ é a tensão aplicada.

Esses parâmetros foram utilizados para avaliar a resistência do ligante à deformação permanente sob carregamentos repetidos.

3.8.6 Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional (RTFOT)

O ensaio RTFOT foi realizado com o objetivo de simular o envelhecimento de curto prazo do ligante asfáltico durante os processos de usinagem e aplicação em campo. Esse ensaio é feito seguindo o proposto na norma NBR 15235:2009 (ABNT, 2009). O ensaio consistiu basicamente em despejar uma pequena quantidade de ligante em frascos de vidro para cobrir toda a sua superfície interna. Os frascos foram pesados antes da inserção de ligante e depois que o ligante já tinha esfriado dentro do vidro. Os frascos foram então posicionados em um suporte rotativo dentro de um forno mantido a aproximadamente 163 °C, com fluxo contínuo de ar aquecido.



Figura 3.20. Exterior e interior de um forno para ensaio de RTFOT.

Durante o ensaio, os frascos permaneceram em rotação constante por 85 minutos, promovendo a formação de um filme fino de ligante nas paredes internas do recipiente, o que favoreceu a

oxidação acelerada do material. Após o término do ensaio, os frascos foram removidos do forno e resfriados, sendo então determinada a variação de massa do ligante, utilizada para avaliar perdas por volatilização.

O ligante envelhecido obtido no ensaio foi posteriormente utilizado na determinação de propriedades físicas e reológicas, permitindo avaliar a alteração do comportamento do material após o envelhecimento de curto prazo.

3.8.7 LAS – *Linear Amplitude Sweep*

O ensaio LAS (*Linear Amplitude Sweep*), normatizado pela AASHTO TP 101 (AASHTO, 2014), seguiu um procedimento acelerado, com duração de média de aproximadamente 30 minutos, com o objetivo de prever a resistência à fadiga de ligantes asfálticos que passaram por envelhecimento a curto prazo. O ensaio foi realizado no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR), utilizando placas paralelas de 8 mm de diâmetro com um espaçamento de 2 mm entre elas.

A execução do ensaio dividiu-se estruturalmente em duas etapas principais: varredura de frequência e varredura de amplitude. Na varredura de amplitude aplicou-se uma deformação constante e baixa de 0,1% em frequências que variam de 0,1 a 30 Hz. O objetivo é determinar as propriedades reológicas intactas do material, ou seja, na sua região de viscoelasticidade linear. Já na varredura de amplitude aplicou-se uma frequência constante de 10 Hz com níveis de deformação crescentes (de 0,1% a 30%). O objetivo dessa etapa é forçar e acelerar o acúmulo de danos na amostra.

Para interpretar o decréscimo da rigidez do ligante ao longo do teste, os resultados foram processados aplicando-se o modelo VECD (*Viscoelastic Continuum Damage*). O objetivo final desse processamento é ajustar a lei de fadiga do material, dada pela Eq. 3.3.

$$N_f = A \cdot \gamma^B \quad (\text{Eq. 3.3})$$

onde N_f é o número de ciclos até a ruptura, γ é a deformação cisalhante máxima esperada e A e B são constantes do material obtidas matematicamente com auxílio do ajuste da Eq. 3.3. Esse ajuste matemático foi feito com auxílio do *software Microsoft Excel* em uma planilha disponibilizada pelo MARC – *Modified Asphalt Research Center*.

E, por fim, com esses dados é possível garantir a qualidade do CAP a ser usado nas misturas.

3.9 Compactação dos Corpos de Prova

Para este estudo serão feitas duas misturas diferentes, uma como objetivo de reproduzir o que foi executado em campo no segmento experimental, chamado agora de Mistura A, e outra mistura com o objetivo de reproduzir os parâmetros do ponto ótimo da dosagem produzida para o projeto do pavimento do segmento experimental, chamado de Mistura B.

Ambas as misturas foram compactadas no compactador giratório *GALILEO* da *IPC Global-Controls* (Figura 3.21), seguindo o proposto na norma DNIT 178/2018 (DNIT, 2018c). As informações a serem reproduzidas para a compactação das misturas está definido na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Dados usados para compactação dos corpos de prova

Propriedade	Mistura A	Mistura B
Densidade Relativa Máxima (g/cm ³)	2,472	2,523
Porcentagem de Asfalto (%)	5,27	4,56
Densidade Relativa Aparente (g/cm ³)	2,387	2,413
Volume de Vazios (%)	3,42	4,36
Temperatura de Mistura (°C)	155	
Temperatura de Compactação (°C)	142	
Número de Giros	100	
Tensão Aplicada (kPa)	600	
Ângulo de Inclinação Durante Compactação (°)	1,25	



Figura 3.21. Compactador giratório usado para confecção dos corpos de prova de ambas as misturas.

3.10 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos a serem realizados estão dispostos na Tabela 3.5. Esses ensaios irão caracterizar as duas misturas estudadas e gerar um banco de dados a ser usado nas análises computacionais feitas posteriormente.

Tabela 3.5. Normas usadas nos ensaios de caracterização mecânica de misturas asfálticas.

ENSAIO	NORMA
Resistência à Tração por Compressão Diametral	DNIT 136/2018 – ME
Módulo de Resiliência	DNIT 135/2018 – ME
Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada	DNIT 183/2018 – ME

3.10.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral, realizado seguindo o proposto em DNIT 136/2018 – ME (DNIT, 2018b), corpos de prova cilíndricos foram posicionados horizontalmente entre os pratos da prensa e submetidos a carregamento compressivo aplicado ao longo do diâmetro vertical. A carga foi aplicada de forma contínua até a ruptura da amostra. A resistência à tração indireta foi calculada a partir da carga máxima registrada utilizando a Eq. 3.4.

$$RT = \frac{20P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (Eq. 3.4)$$

onde RT é resistência à tração (MPa), P é carga máxima aplicada (kgf), D é diâmetro do corpo de prova (mm), H é altura do corpo de prova (mm).



Figura 3.22. Prensa usada nos ensaios de resistência à tração.

3.10.2 Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência segue o proposto em DNIT 135/2018 – ME (DNIT, 2018a). Esse ensaio foi realizado submetendo corpos de prova cilíndricos a carregamentos repetidos de compressão diametral, aplicados em pulsos havendo períodos de carga e repouso com 1 Hz de

frequência. Durante o ensaio foram registradas as deformações horizontais recuperáveis por meio de transdutores.

Nesse ensaio um mesmo corpo de prova é submetido a 3 diferentes níveis de tensão (15%, 20% e 25% da resistência à tração). Inicialmente o corpo de prova é submetido a 50 ciclos de condicionamento onde não há armazenamento de informações, após isso, para cada uma das porcentagens de tensão o corpo de prova é submetido a mais 15 ciclos e o módulo para aquela tensão é a média dos 5 últimos ciclos.



Figura 3.23. Equipamento utilizado para os ensaios de módulo de resiliência e vida de fadiga.

O módulo de resiliência foi determinado pela relação entre a tensão aplicada e a deformação resiliente medida, conforme a Eq. 3.5.

$$MR = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_r} \quad (Eq. 3.5)$$

Onde MR é o módulo de resiliência (MPa), σ_t é a tensão de tração gerada no plano diametral (MPa), ε_r é a deformação resiliente recuperável.

3.10.3 Vida de Fadiga

No ensaio de fadiga por compressão diametral a norma a ser seguida é a DNIT 183/2018 – ME (DNIT, 2018e). Ness ensaio os corpos de prova foram submetidos a carregamentos cíclicos com nível de tensão constante (40%, 35%, 30% e 20% da RT) aplicado ao longo do diâmetro vertical. O ensaio foi conduzido até a ruptura da amostra. Os resultados foram ajustados por meio das Eq. 3.6 e Eq. 3.7.

$$N_f = k(\Delta\sigma)^n \quad (Eq. 3.6)$$

ou

$$N_f = k \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^n \quad (Eq. 3.7)$$

onde N_f é número de ciclos até a ruptura (vida de fadiga), σ é diferença de tensão (MPa), ε_t é a deformação de tração, k_1 e k_2 são coeficientes obtidos por regressão dos dados experimentais.

Com os resultados desses ensaios serão obtidos parâmetros para constantes e para modelos matemáticos, representando como o material de comporta.

3.11 Análises Computacionais

O conhecimento do comportamento mecânico das misturas asfálticas adquiridos no item anterior, possibilita-se o uso de modelos de dimensionamento mecanístico-empírico para avaliar o estado de tensão-deformação em estruturas de pavimento e seu desempenho ao longo do tempo.

Será usado o *software* MeDiNa v.2.0.0 e AEMC versão v.2.4.6 para obter previsões da porcentagem de área trincada e do valor do afundamento da trilha de roda, considerando diferentes condições. Para as análises considerou-se as diferentes misturas estudadas, diferentes combinações de camadas e diferentes níveis de umidade na camada de subleito. Dados das


camadas geotécnicas foram obtidos de Caetano (2024) e dados da correlação entre módulo de resiliência e a umidade do subleito serão obtidos de Cardoso (2024).

3.11.1 Cenários Modelados Computacionalmente

Serão formados diferentes cenários que englobam numa mesma estrutura diferentes características com o objetivo de comparar e analisar os resultados obtidos do programa com as variações implementadas nos dados de entrada.

Alguns fatores foram considerados para formação dos cenários, o primeiro é a geometria da estrutura. Para a escolha das geometrias, foram usadas as espessuras das camadas construídas nas 3 seções do segmento experimental, como demonstrado na Figura 3.3, todavia deve-se considerar que o MeDiNa não aceita espessuras abaixo de 5,0 cm para a camada de revestimento (DNIT, 2025). Para contornar esse problema em todos os cenários foi usado o *software* AEMC para calcular as tensões no pavimento e para calcular a área trincada foi usado *software Excel* com as equações disponibilizadas pelo Manual de Ajuda – PROGRAMA MeDiNa – v.2.0.0 (DNIT, 2025), na Tabela 3.6 então determinados as geometrias a serem usadas.

Tabela 3.6. Geometrias utilizadas para formação dos cenários

Geometria	Código
 <p>Revestimento – 3,5 cm</p> <p>Base (Material BS-SE) – 15,0 cm</p> <p>Sub-base (Material SB-SE) – 15,0 cm</p> <p>Subleito</p>	G1

<div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px;">Revestimento – 3,5 cm</div> <div style="background-color: #8B4513; padding: 20px; text-align: center;">Base (Material SB-SE) – 30,0 cm</div> <div style="background-color: #D2691E; padding: 2px;">Subleito</div>	G2
<div style="background-color: #333; color: white; padding: 2px;">Revestimento – 3,5 cm</div> <div style="background-color: #8B4513; padding: 20px; text-align: center;">Base (Material SB-SE) – 20,0 cm</div> <div style="background-color: #D2691E; padding: 2px;">Subleito</div>	G3

Outro fator a ser considerado é o concreto asfáltico a ser utilizado na camada de revestimento. Esta dissertação estudou a Mistura A e a Mistura B. Na Tabela 3.7 estão os códigos usados para formação dos cenários.

Tabela 3.7. Misturas utilizadas na formação dos cenários.

Material da Camada de Revestimento	Código
CAUQ - Mistura A	MA
CAUQ - Mistura B	MB

E o último fator a ser considerado é a umidade do subleito. Dados para a formação desse cenário são originados de trabalhos anteriores (Cardoso, 2024) do grupo de pesquisa que o autor faz parte. Na Tabela 3.8 estão os códigos usados para formação dos cenários.

Tabela 3.8. Condições do subleito utilizadas na formação de cenários.

Condição do Subleito	Código
Compactado na umidade ótima	OT

Compactado 2% acima da umidade ótima	COM+2%
Compactado 2% abaixo da umidade ótima	COM-2%
Compactado na umidade ótima e variação de +2% da umidade APÓS compactação	PÓS+2%
Compactado na umidade ótima e variação de -2% da umidade APÓS compactação	PÓS-2%

Para melhor comparação e análise dos resultados não houve variação de mais de uma característica ao mesmo tempo, sendo então formados os 8 cenários como apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9. Cenários a serem analisados no MeDiNa.

#	Cenário
1 (Referência)	MA-G1-OT
2	MB-G1-OT
3	MA-G2-OT
4	MA-G3-OT
5	MA-G1-COM+2%
6	MA-G1-COM-2%
7	MA-G1-PÓS+2%
8	MA-G1-PÓS-2%

A caracterização física e mecânica dos materiais das camadas granulares (BS-SE e SB-SE) forma caracterizados por Caetano (2024) e o material utilizado no subleito foi caracterizado por Cardoso (2024).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios laboratoriais realizados nas placas extraídas do segmento experimental, nos agregados minerais, no ligante asfáltico e nas misturas asfálticas produzidas. Também serão apresentadas as análises computacionais no *software* MeDiNa.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E VOLUMÉTRICA DA CAMADA DE REVESTIMENTO DO SEGMENTO EXPERIMENTAL

Para a caracterização do material usado no segmento experimental foi realizado os ensaios laboratoriais e comparado com o especificado em projeto para execução do pavimento, com o objetivo de avaliar a execução da obra.

4.1.1 Porcentagem de Asfalto

O ensaio de Porcentagem de Ligante Asfáltico (Pb) feito utilizando o método de ignição em mufla teve os resultados apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Resultados do Ensaio de Porcentagem de Ligante Asfáltico

Dados	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa Inicial da Amostra (g)	1939,4	3046,0	2514,3
Massa Final da Amostra (g)	1837,8	2885,7	2381,2
Tempo da Amostra no Forno (min)	49	66	53
Temperatura do Forno (°C)	538	538	538
Porcentagem de Betume (%)	5,24	5,26	5,29
Pb (%)		5,27	

O projeto elaborado para execução deste segmento experimental definiu o teor ótimo de ligante asfáltico em 4,56%. Em comparação com o definido no projeto, a mistura usada na execução tem excesso de ligante, o que vai impactar as demais medidas volumétricas estudadas a seguir.

4.1.2 Densidade Relativa Máxima

O ensaio de Densidade Relativa Máxima (DRM) feito por meio do *Rice Test* teve os resultados apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Tabela de Resultados do *Rice Test*

Dados	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa da Amostra (g)	1502,4	1546,4	1517,8
Massa do Recipiente + Água (g)	7368,1	7368,1	7368,1
Massa do Recipiente + Água + Amostra (g)	8265,4	8288,5	8269,3
Temperatura da Água (°C)	23,0	23,0	23,0
Densidade Relativa Máxima	2,483	2,470	2,462
Gmm		2,472	

A densidade relativa máxima encontrada nas placas de concreto asfáltico do segmento experimental está abaixo dos 2,523 de DRA definida no estudo de dosagem da mistura asfáltica. Esse resultado é esperado, uma vez que o ligante asfáltico é muito menos denso que o agregado mineral, e o aumento da porcentagem de ligante em relação a projetada resultaria na diminuição da densidade da mistura asfáltica.

4.1.3 Densidade Relativa Aparente

O ensaio de Densidade Relativa Aparente (DRA) têm seus resultados apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Dados do Ensaio de DRA

Dados	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa do Corpo de Prova Seco ao Ar (g)	680,2	673,0	718,3
Massa do Corpo de Prova Submerso (g)	399,8	391,7	420,4
Massa Saturada Superfície Seca (g)	681,4	674,6	720,5
Temperatura da Água (°C)	23	23	23
Densidade Relativa Aparente	2,415	2,379	2,394
Gmb		2,387	

O resultado presente é de 2,413, mais uma vez acima do realmente encontrado nas placas. O que pode ser explicado, mais uma vez, pelo aumento de ligante em relação ao esperado, demonstrando que o controle na quantidade de ligante é crucial para manter os parâmetros volumétricos de acordo com o projetado.

4.1.4 Demais Parâmetros Volumétricos

Com os dados obtidos nos itens 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 foi calculado outras características da mistura asfáltica executada em campo. Esses resultados são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Resultados de parâmetros volumétricos.

Parâmetro	CP 1	CP 2	CP 3	Média
Volume de Vazios (%)	3,32	3,76	3,17	3,42
Vazios no Agregado Mineral (%)	16,70	17,09	16,58	16,79
Relação Betume Vazios (%)	80,14	77,97	80,85	79,65

É possível observar que o volume de vazios tem uma média de 3,42%, menor que o determinado na dosagem do projeto de 4,36%. A diminuição do volume de vazios sendo resultado da maior quantidade de ligante faz sentido, uma vez que mais ligante é capaz de preencher mais espaços vazios entre os agregados minerais. Um volume de vazios menor que 4% em uma mistura asfáltica densa, pode resultar em patologias como exsudação.

Já os vazios no agregado mineral resultaram em uma média de 16,79%, o que é maior que o encontrado na dosagem de projeto de 15,30%. Um aumento do VAM em decorrência de um aumento do teor de ligante demonstra que a quantidade de ligante extra, em relação ao determinado em dosagem, está afastando os agregados minerais na estrutura da mistura e não somente preenchendo espaços vazios de ar, o que é mais uma indicação que essa mistura pode acarretar problemas como exsudação.

E, por fim, a relação betume vazios encontrada na mistura está acima do máximo designado pelo DNIT (DNIT, 2024b). Esse número acima do recomendado pelas normas nacionais, além dos problemas citados anteriormente pode também ser resultar em patologias como afundamento de trilhas de roda.

Para melhor visualização, está na Tabela 4.5 a comparação entre os dados encontrados na amostra extraída em campo e o determinado no projeto de dosagem para execução do trecho experimental.

Tabela 4.5. Dados obtidos da caracterização física das placas de CA extraídas.

	Amostra Extraída	Projeto
Densidade Relativa Máxima	2,472	2,523
Porcentagem de Asfalto	5,27%	4,56%
Densidade Relativa Aparente	2,387	2,413
Volume de Vazios	3,42%	4,36%
Vazios no Agregado Mineral	16,79%	15,30%
Relação Betume Vazios	79,65%	71,40%

4.1.5 Curva Granulométrica dos Agregados Minerais

A Figura 4.1 apresenta a curva granulométrica da amostra extraída em comparação com a granulometria de projeto, evidenciando que o executado em campo está coincidindo com o projetado.

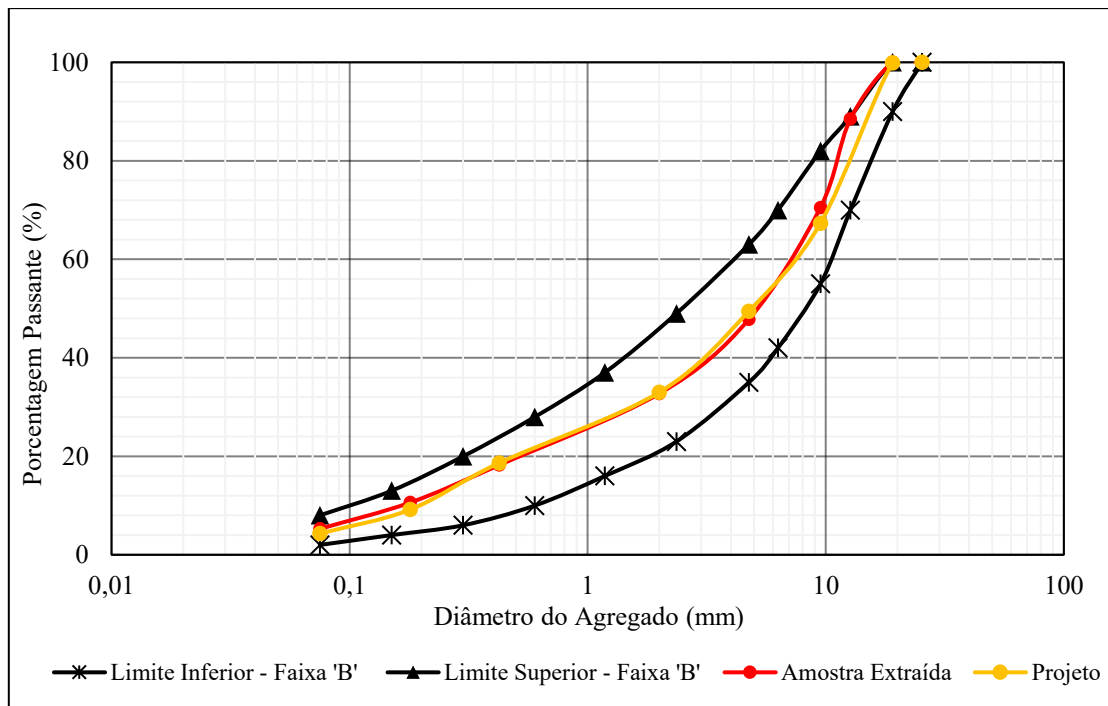


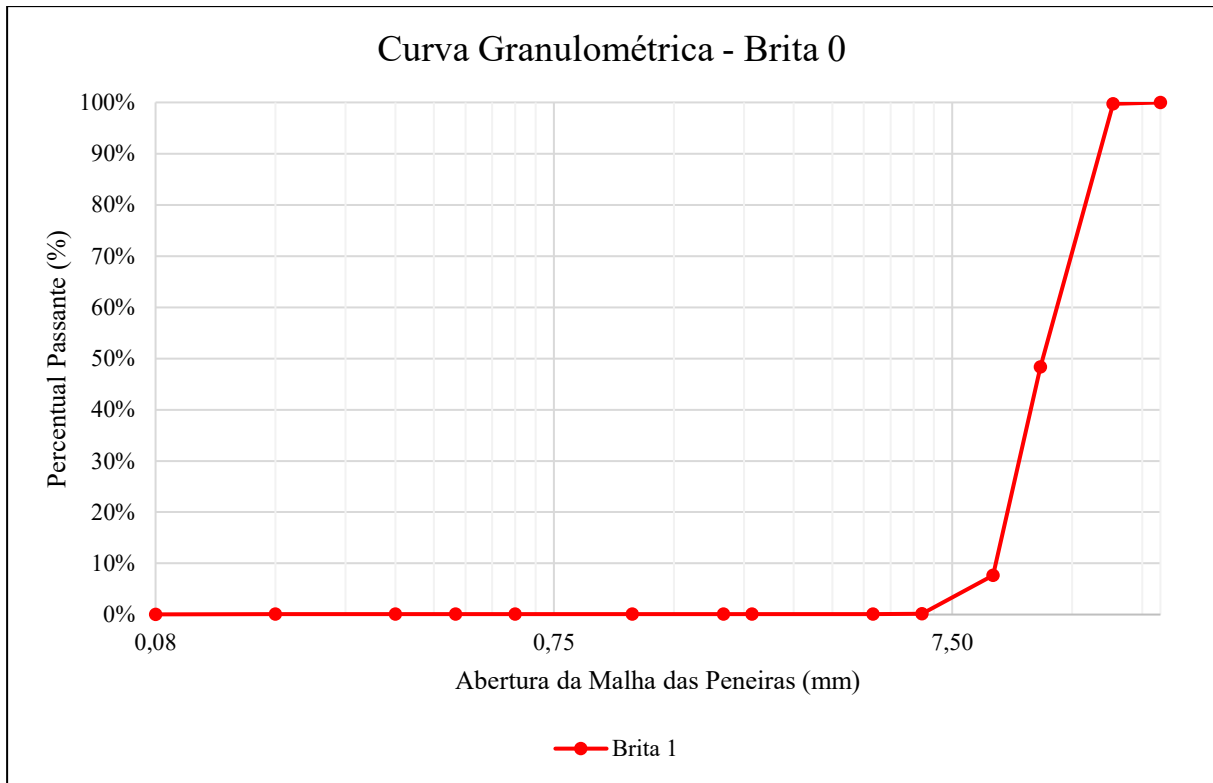
Figura 4.1. Curva granulométrica da mistura usada no revestimento dos SE.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MINERAIS

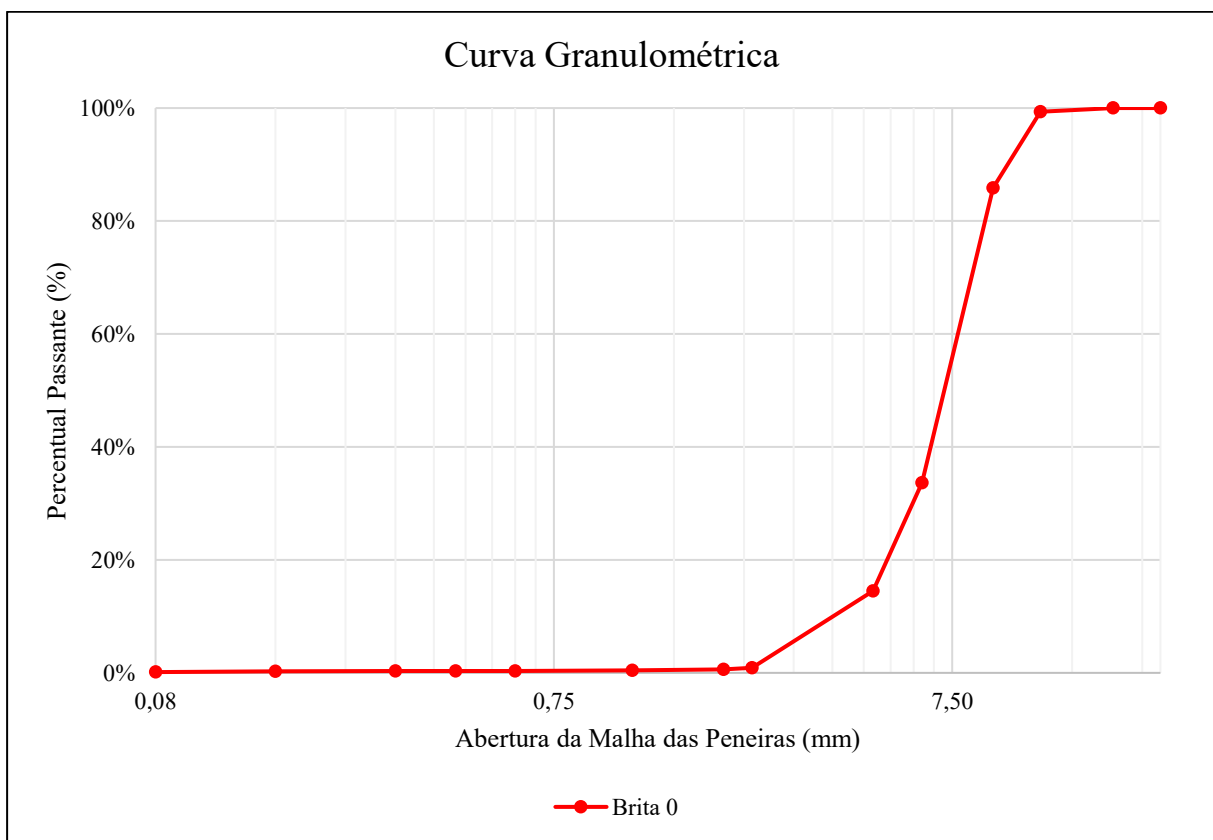
O concreto asfáltico usado no revestimento do segmento experimental foi executado com uma mistura de agregados compostos de brita 0, brita 1, pó de pedra e areia do próprio estado de Roraima, para determinar a qualidade do agregado mineral utilizado foi realizado ensaios laboratoriais.

4.2.1 Análise Granulométrica

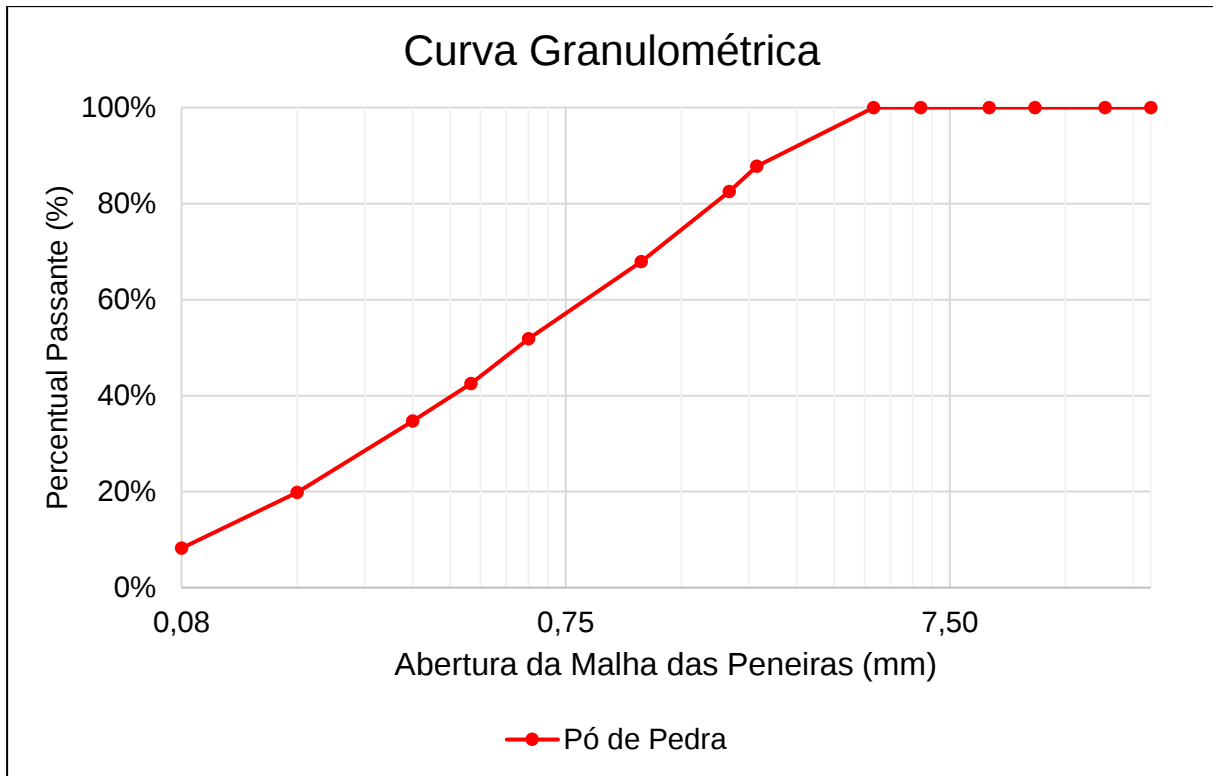
Na Figura 4.2 estão os dados obtidos pelo peneiramento de cada um dos agregados minerais ensaiados



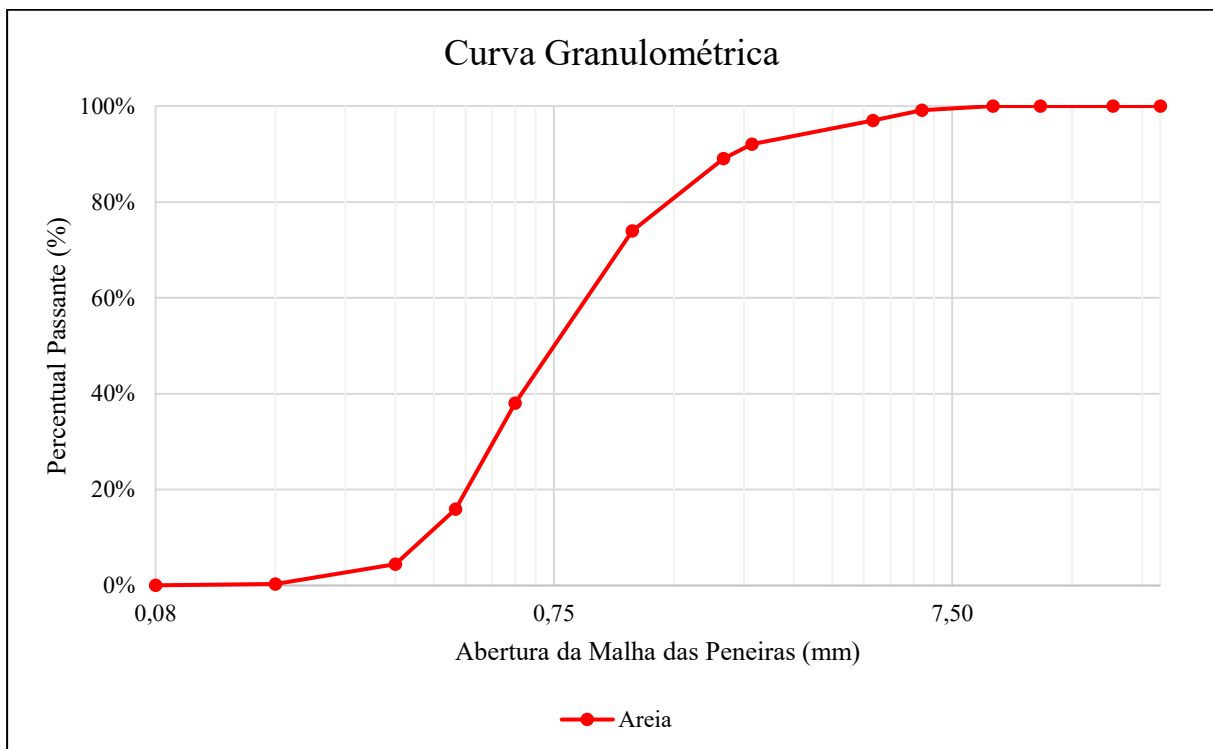
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.2. Curvas granulométricas resultantes do peneiramento dos agregados mineiras para a fração correspondente a (a) Brita 1, (b) Brita 0, (c) Pó de Pedra e (d) Areia.

Foram ensaiadas 3 amostras, proveniente de diferentes momentos de coleta em campo, e para cada um dos agregados minerais, após quarteamento, foi observado que em nenhuma delas os valores de porcentagem retida individualmente diferiram mais que 4% entre si, seguindo o exigido em norma. Isso demonstra que a britagem, seleção e separação dos agregados usados foi feito de forma correta.

4.2.2 Densidade Real, Densidade Aparente e Absorção

A Tabela 4.6 apresenta os resultados do ensaio de massa específica para a brita 1.

Tabela 4.6. Resultado do ensaio de densidade real, aparente e absorção para brita 1.

Dado	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Média
Massa Seca (g)	3019,4	3013,7	2839,9	
Massa na Condição Saturado com a Superfície Seca (g)	3066,0	3066,2	2880,5	
Massa Submersa (g)	1903,0	1894,9	1786,6	
Temperatura da Água (°C)	25	25	25	
Densidade Relativa Real dos Grãos (g/cm ³)	2,705	2,694	2,696	2,698
Densidade Relativa Aparente (g/cm ³)	2,596	2,573	2,596	2,588
Absorção	1,5%	1,7%	1,4%	1,6%

A Tabela 4.7 apresenta os resultados do ensaio de massa específica para a brita 0.

Tabela 4.7. Resultado do ensaio de densidade real, aparente e absorção para brita 0.

Dado	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Média
Massa Seca (g)	2011,6	2013,3	2009,2	
Massa na Condição Saturado com a Superfície Seca (g)	2052,7	2042,1	2048,6	
Massa Submersa (g)	1277,2	1266,3	1261,6	
Temperatura da Água (°C)	25	25	25	
Densidade Relativa Real dos Grãos (g/cm ³)	2,739	2,695	2,688	2,707
Densidade Relativa Aparente (g/cm ³)	2,594	2,595	2,553	2,581
Absorção	2,0%	1,4%	2,0%	1,8%

A Tabela 4.8 apresenta os resultados do ensaio de massa específica para o pó de pedra.

Tabela 4.8. Resultado do ensaio de densidade real, aparente e absorção para pó de pedra.

Dado	Amostra A	Amostra B	Média
Massa Seca (g)	491,6	493,1	
Massa na Condição Saturado com a Superfície Seca (g)	499,6	499,4	
Massa do Picnômetro com Água (g)	801,2	801,2	
Massa Submersa	1111,7	1111,1	
Temperatura da Água (°C)	25	25	
Densidade Relativa Real dos Grãos (g/cm ³)	2,715	2,692	2,703
Densidade Relativa Aparente (g/cm ³)	2,600	2,602	2,601
Absorção	1,6%	1,3%	1,5%

A Tabela 4.9 apresenta os resultados do ensaio de massa específica para a areia.

Tabela 4.9. Resultado do ensaio de densidade real, aparente e absorção para areia.

Dado	Amostra A	Amostra B	Média
Massa Seca (g)	495,3	496,2	
Massa na Condição Saturado com a Superfície Seca (g)	499,9	499,9	
Massa do Picnômetro com Água (g)	801,2	801,2	
Massa Submersa	1109,7	1110,0	
Temperatura da Água (°C)	25	25	
Densidade Relativa Real dos Grãos (g/cm ³)	2,651	2,648	2,650
Densidade Relativa Aparente (g/cm ³)	2,588	2,597	2,592
Absorção	0,9%	0,7%	0,8%

É possível aferir desses resultados que não há grande porosidade interna nos agregados, uma vez que as densidades estão condizentes com o esperado e a absorção de todos os agregados estão baixas. É observado também que a porcentagem de absorção ficou abaixo do máximo determinado na normativa de desempenho do DNIT (DNIT, 2024b).

4.2.3 Adesividade

A Figura 4.3. abaixo é um registro fotográfico do agregado mineral no final do ensaio de adesividade demonstrando que não houve nenhum deslocamento da película de ligante da amostra do agregado após o período de 72 horas em estufa.



Figura 4.3. Resultado do ensaio de adesividade do agregado mineral

4.2.4 Equivalente de Areia

Na Tabela 4.10 Tabela 4.10. Resultados do ensaio de equivalente de areia para o agregado mineral pó de pedra. estão os resultados do ensaio de equivalente de areia para o pó de pedra, e na Tabela 4.11 são apresentados os resultados para a areia estudada.

Tabela 4.10. Resultados do ensaio de equivalente de areia para o agregado mineral pó de pedra.

	Amostra A	Amostra B	Amostra C
Leitura no Topo da Areia (cm)	6,9	6,8	7,2
Leitura no Topo de Argila (cm)	7,9	7,7	8,3
Equivalente de Areia (%)	87,3	88,3	86,7
Média	88		

Tabela 4.11. Resultados do ensaio equivalente de areia para o agregado mineral areia.

	Amostra A	Amostra B	Amostra C
Leitura no Topo da Areia (cm)	8,7	9,3	10,0
Leitura no Topo de Argila (cm)	9,3	9,9	10,5
Equivalente de Areia (%)	93,5	93,9	95,2

Como esperado, a areia possui menos material filer que o pó de pedra, entretanto ambos os materiais apresentam um equivalente de areia acima de 55%, exigido em norma (DNIT, 2024b), demonstrando que são agregados que não possuem grande quantidade argila em sua composição, o que era esperado quando observado suas curvas granulométricas. Esse resultado também é importante para atestar a qualidade do material usado

4.2.5 Índice de Forma dos Agregados Graúdos

O índice de forma feito pelo crivo obteve os resultados apresentados na Tabela 4.12 para a brita 1

Tabela 4.12. Porcentagens retidas nos crivos redutores para a brita 1.

Graduação	Crivo de Abertura Circular		Crivos Redutores					
			Crivo 1			Crivo 2		
	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Porcentagem Retida (%)	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Porcentagem Retida (%)
C	16	2002,4	9,5	1524,3	76,1	6,3	430,0	21,5
	12,7	2000,6	8	1397,4	69,8	5,3	548,1	27,4
	9,5	2001,4	6,3	1236,6	61,8	4,2	633,2	31,6

Esses dados resultam em um índice de forma $f = 0,83$. E, para o a brita 0, os resultados estão expostos na Tabela 4.13.

Tabela 4.13. Porcentagens retidas nos crivos redutores para a brita 0.

Graduação	Crivo de Abertura Circular		Crivos Redutores					
			Crivo 1			Crivo 2		
	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Porcentagem Retida (%)	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Porcentagem Retida (%)
D	9,5	1001,2	6,3	751,8	75,1	4,2	220,7	22,0
	6,3	1000,7	4,8	737,9	73,7	3,2	237,8	23,8

Esses resultados chegam a um índice de forma $f=0,86$.

No ensaio de índice de forma pelo método do crivo, quanto mais próximo de 1 mais cúbido são as pedras do agregado. Em ambos os agregados ensaiados os valores encontrados são satisfatórios, acima dos 0,5 requeridos em normativo brasileiro (DNIT, 2024b).

4.2.6 Teor de Vazios dos Agregados Miúdos

Para atestar a angularidade dos agregados miúdos foi feito o teste de teor de vazios na areia e no pó de pedra. Os resultados estão na Tabela 4.14 para o pó de pedra e na Tabela 4.15 para a areia.

Tabela 4.14. Resultados do teor de vazios para o pó de pedra

	Amostra A	Amostra B	Amostra C
Massa do Frasco + Agregados (g)	210,40	212,70	211,80
Massa dos Agregados (g)	148,6	150,90	150,00
Volume do Frasco (ml)		107,5	
Densidade Aparente dos Agregados (g/cm ³)		2,601	
Teor de Vazios dos Agregados Não Compactados (%)	46,8	46,0	46,3
Média (%)		46,4	

Tabela 4.15. Resultados do teor de vazios para a areia

	Amostra A	Amostra B	Amostra C
Massa do Frasco + Agregados (g)	218,00	217,40	217,20
Massa dos Agregados (g)	156,2	155,60	155,40
Volume do Frasco (ml)		107,5	
Densidade Aparente dos Agregados (g/cm ³)		2,592	
Teor de Vazios dos Agregados Não Compactados (%)	43,9	44,2	44,2
Média (%)		44,1	

Como esperado a angularidade obtida por meio do teor de vazios para o pó de pedra, um material britado, é maior que para a areia, um material natural. Ademais, ambos estão acima do mínimo exigido pelo DNIT de 40% (DNIT, 2024b).

4.2.7 Desgaste por Abrasão Los Angeles

O resultado do ensaio desgaste por abrasão e impacto no equipamento “Los Angeles” foi feito nos agregados brita 1 e brita 0. Para a brita 1 os resultados são apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16. Abrasão Los Angeles para brita 1

Graduação	Massa Antes		Massa Depois	Desgaste
	Abertura (mm)	Massa Retida (g)		
B	12,5	2508,8	4387,7	12%
	9,5	2501,0		

E os resultados da brita 0 estão apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17. Abrasão Los Angeles para brita 0

Graduação	Massa Antes		Massa Depois	Desgaste
	Abertura (mm)	Massa Retida (g)		
B	6,3	2506,7	4288,1	14%
	4,8	2502,5		

É observado que os materiais têm resultados satisfatórios quanto ao critério de desgaste, apresentando valores baixos e dentro do limite aceitável do DNIT (DNIT, 2024b) de 50% ou menos.

Para melhor compreensão na Tabela 4.18 é apresentado um resumo dos resultados encontrados para os agregados minerais dessa pesquisa, com as respectivas especificações mínimas.

Tabela 4.18. Resumo dos resultados dos agregados minerais

Característica	Especificação DNIT 031/2024	Resultado
BRITA 1		
Densidade Real (g/cm ³)	-	2,698
Densidade Aparente (g/cm ³)	-	2,588
Absorção (%)	≤ 2,0%	1,6
Índice de Forma	≥ 0,5	0,83
Abrasão (%)	≤ 50%	12
BRITA 0		
Densidade Real (g/cm ³)	-	2,707
Densidade Aparente (g/cm ³)	-	2,581
Absorção (%)	≤ 2,0%	1,8
Índice de Forma	≥ 0,5	0,86
Abrasão (%)	≤ 50%	14
PÓ DE PEDRA		
Densidade Real (g/cm ³)	-	2,703
Densidade Aparente (g/cm ³)	-	2,601
Absorção (%)	≤ 2,0%	1,5%
Teor de Vazios (%)	≥ 40,0%	46,4
Equivalente de Areia (%)	≥ 55%	88
AREIA		
Densidade Real (g/cm ³)	-	2,650
Densidade Aparente (g/cm ³)	-	2,592
Absorção (%)	≤ 2,0%	0,8
Teor de Vazios	≥ 40,0%	44,1
Equivalente de Areia	≥ 55%	94

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

Foi estudado o ligante asfáltico com o objetivo de atestar seu desempenho e garantir a qualidade do CAP usado no segmento experimental e determinar a adequação do uso deste CAP quanto ao clima e tráfego.

4.3.1 Penetração

A Tabela 4.19 apresenta o resultado das 3 medidas de penetração feitas com a amostra de CAP 50/70.

Tabela 4.19. Resultado do ensaio de penetração por agulha

Medida	Limite (0,1 mm)		Penetração (0,1mm)
1	50	70	65,417
2	50	70	66,375
3	50	70	67,997
	Média		66,596

Apesar de ficar mais próximo do limite superior o ligante se encontra dentro dos valores definidos pela ANP (ANP, 2022).

4.3.2 Ponto de Amolecimento

Usando o método de anel e bola, os resultados para o ensaio de ponto de amolecimento do ligante asfáltico estão exibidos na Tabela 4.20.

Tabela 4.20. Resultado do ensaio de anel e bola.

Anel e Bola	Limite (°C)	Ponto de Amolecimento (°C)
1	≥ 46	48,1
2	≥ 46	47,2
	Média	47,7

Mais uma vez, o resultado está bem próximo do limite, porém ainda segue dentro do mínimo estabelecido pela resolução da ANP (ANP, 2022).

4.3.3 Viscosidade Rotacional

Na Tabela 4.21 estão os resultados da viscosidade Brookefield para as 3 temperaturas requeridas.

Tabela 4.21. Resultados do ensaio de viscosidade Brookefield

Temperatura (°C)	Torque	Haste	Velocidade	Limites (cP)	Viscosidade (cP)
135	17,0%	SP21	20 rpm	≥ 274	423,8
150	20,5%	SP21	50 rpm	≥ 112	204,9
177	15,2%	SP21	100 rpm	$\geq 57 \leq 285$	75,45

Em todas as temperaturas a viscosidade encontrada estava dentro das especificações, atestando a qualidade do CAP usado na obra. Com os dados de viscosidade também foi possível determinar a temperatura de mistura e de compactação a ser usada durante a confecção dos corpos de prova para os ensaios de desempenho. O gráfico foi usado para determinar esses parâmetros está apresentado na Figura 4.4.

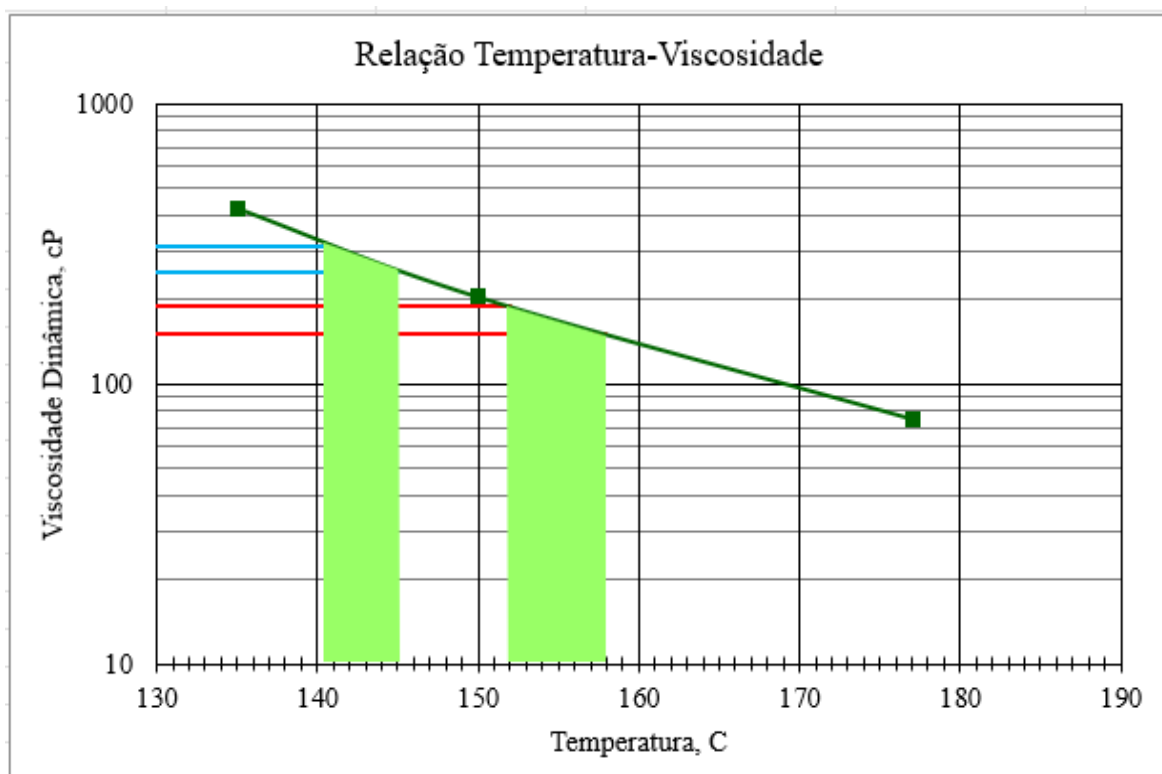


Figura 4.4. Gráfico da relação da temperatura do ligante com sua viscosidade.

As temperaturas para compactação e mistura foram definidas em conforme a DNIT 178 – PRO (DNIT, 2018c), que afirma que o ligante deve ser aquecido de modo a apresentar viscosidades de $(0,17 \pm 0,02)$ Pa.s para mistura e $(0,28 \pm 0,03)$ Pa.s para compactação. Fixou-se em $142\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura de compactação e $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ para mistura.

4.3.4 Efeito do Calor e do Ar (RTFOT)

O ensaio do efeito do calor e do ar foi feito no forno giratório e a porcentagem de perda de massa está apresentada na Tabela 4.22.

Tabela 4.22. Variação de massa no ligante asfáltico devido ao efeito de calor e ar.

Medidas	Amostra A	Amostra B	Amostra C
Massa do Recipiente (g)	164,56	166,42	163,14
Massa do Recipiente com Ligante Antes do Envelhecimento (g)	200,30	201,39	201,84
Massa do Recipiente com Ligante Após o Envelhecimento (g)	200,20	201,30	201,74

Varição da Massa (%)	-0,280%	-0,257%	-0,258%
MÉDIA		-0,265%	

O valor de 0,265% está abaixo do máximo permitido para um CAP 50/70 de acordo com as especificações da ANP (ANP, 2022) de 0,5%, atestando que o ligante estudado não irá perder trabalhabilidade, e também não terá aumento exagerado de rigidez durante seu envelhecimento a curto prazo.

4.3.5 Classificação por Grau de Desempenho (PG)

Usando um reômetro de cisalhamento dinâmico, foi feito o ensaio para medida do módulo dinâmico de cisalhamento ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ) em 3 amostras do CAP 50/70 estudado. Na Tabela 4.23 estão apresentados os resultados médios apresentados para cada uma das temperaturas necessárias para a classificação.

Tabela 4.23. Resultado da caracterização PG do ligante

Ligante	Medida	Limite	PG 46	PG 52	PG 58	PG 64	PG 70
ORIGINAL	Cisalhamento Dinâmico,	$\geq 1\text{kPa}$	18,46	7,93	3,20	1,43	0,66
RTFOT	$ G^* /\text{sen}\delta$ (kPa)	$\geq 2,2\text{ kPa}$	35,16	14,68	6,53	2,76	1,26

Tanto para o ligante virgem, quanto para o ligante envelhecido, o a temperatura em que CAP não chegou ao critério mínimo requisitado foi de 70°C. O que classifica esse ligante como **PG 64-XX**. Não foi possível realizar o ensaio da temperatura mínima do ligante devido a falta do equipamento BBR (*Bending Beam Rheometer*). A alta temperatura na classificação permite certificar a adequação do uso deste ligante asfáltico para a localidade do segmento experimental.

4.3.6 Caracterização Reológica

Também no reômetro de cisalhamento dinâmico foi feito ensaios para aferição do módulo dinâmico de cisalhamento ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ) em diversas temperaturas, a fim de caracterizar como funciona o comportamento reológico desse ligante CAP 50/70. Para este estudo a varredura de temperaturas foi de 10 °C até 70 °C.

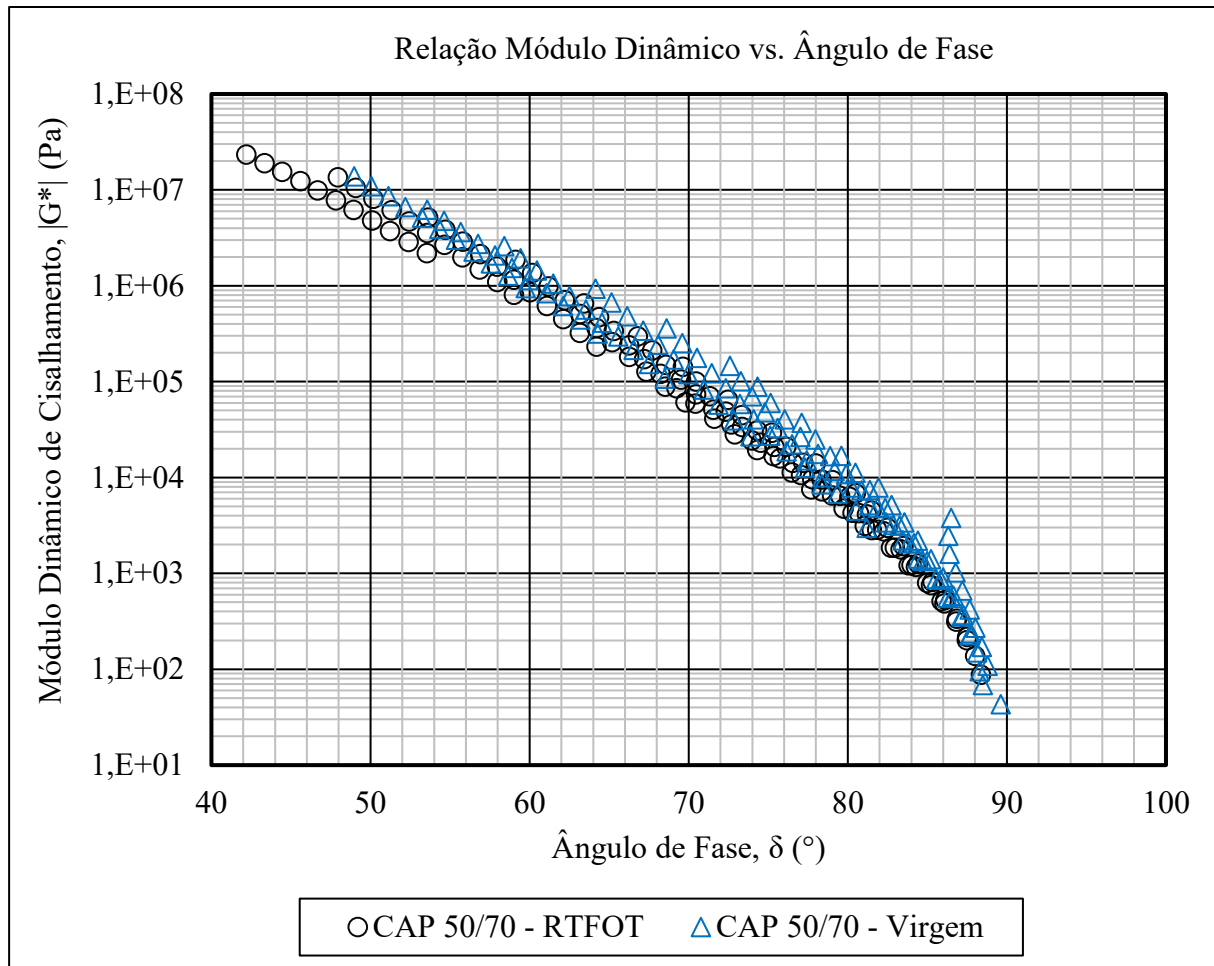


Figura 4.5. Gráfico com a relação do $|G^*|$ com o δ , no estado virgem e envelhecido.

Observando o gráfico da figura Figura 4.5 é visto que como esperado houve um aumento do módulo dinâmico e uma diminuição do ângulo de fase quando há envelhecimento do ligante, fazendo com que a curva pós-RTFOT se desloque para a esquerda e para cima. Todavia, é importante observar que essa variação é bem pequena, evidenciando a capacidade deste CAP estudado de manter razoavelmente suas características de rigidez iniciais mesmo após o envelhecimento inicial correspondente a etapa de mistura e aplicação do concreto asfáltico.

Em seguida foi feita a curva mestra para o ligante estudado. A curva mestra é usada para efeito de comparação do ligante em diferentes temperaturas e segue o princípio de superposição tempo-temperatura onde várias temperaturas podem ser exibidas juntas alterando a frequência e fixando-se uma temperatura de referência, que para esse estudo foi 25 °C.

A construção da curva mestra seguiu o procedimento descrito por Lopes (2022), fundamentado na abordagem originalmente proposta por Pellinen (2001). Para o ajuste dos parâmetros foi empregada a ferramenta Solver do Excel™, utilizada para otimização de dados por meio de regressão não linear pelo método dos mínimos quadrados. O processo consiste em ajustar o modelo de forma a reduzir a soma dos erros quadráticos entre os valores do módulo complexo $|G^*|$ obtidos experimentalmente e aqueles estimados pelo modelo matemático. Durante essa etapa de otimização, os parâmetros de ajuste são iterativamente ajustados até que se obtenha o melhor ajuste entre os dados medidos e os valores previstos.

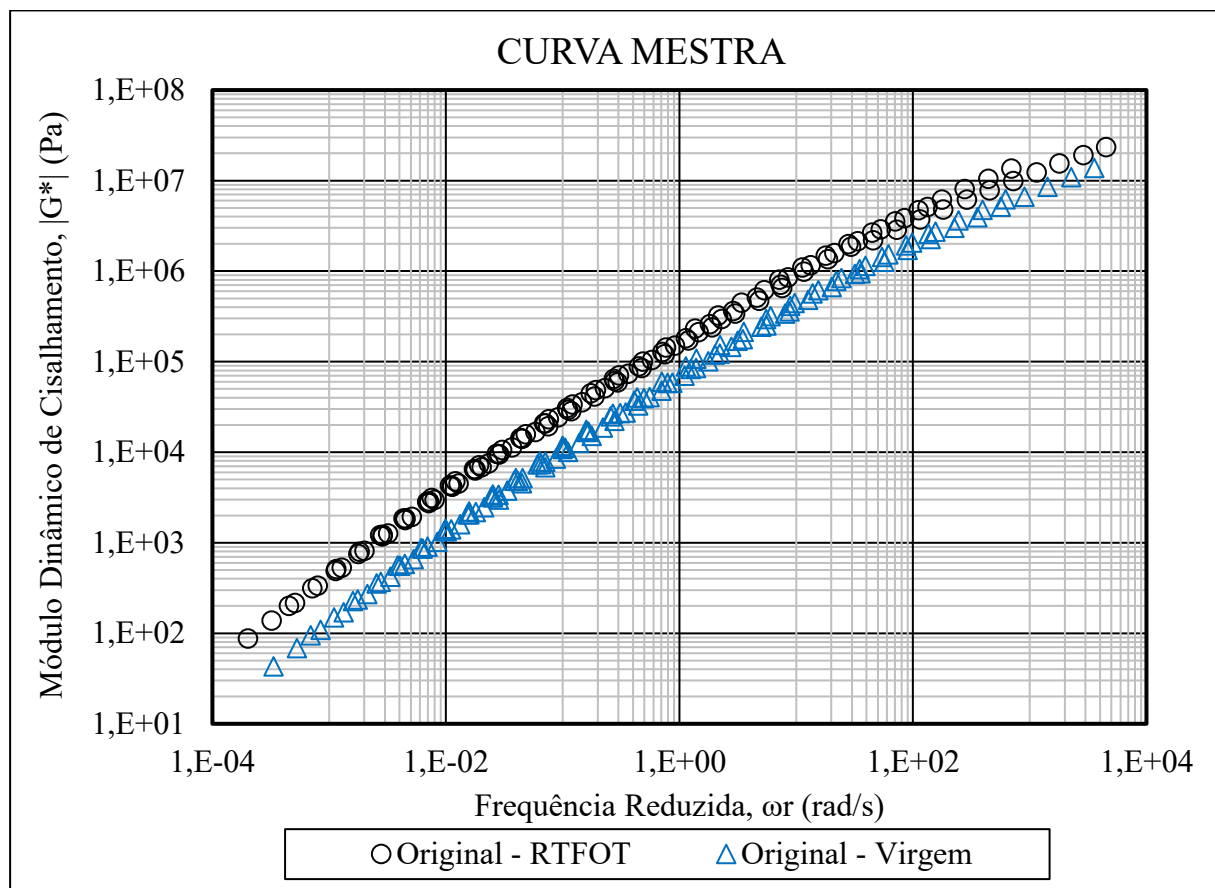


Figura 4.6. Curva mestra do módulo dinâmico para temperatura de 25 °C para ligante virgem e envelhecido.

Confirmando o esperado, o envelhecimento do ligante leva a um maior módulo, ou seja, o envelhecimento aumenta a rigidez do ligante asfáltico. E é possível ainda atestar que para

frequências menores, o que corresponde a temperaturas mais altas, essa variação entre o ligante virgem e o envelhecido é ainda maior. Essa análise é importante para certificar que não houve envelhecimento precoce do ligante na usina e que o ligante usando na obra não terá aumento de rigidez antecipadamente, o que poderia acarretar na propagação de microfissuras na camada de revestimento antes do previsto.

4.3.7 *Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)*

O ensaio MSCR é utilizado para avaliar a susceptibilidade à deformação permanente de ligantes asfálticos em altas temperaturas. O teste consiste na aplicação repetida de ciclos de carregamento e recuperação ao ligante. Para esse teste são apresentados a média de 3 amostras ensaiadas. Todas as amostras foram envelhecidas no RTFO antes do início dos ensaios.

Na Figura 4.7 está apresentado os resultados da compliância não recuperável à 3,2 kPa ($J_{nr3,2}$), que indica a quantidade de deformação permanente acumulada no ligante após todos os ciclos de carga e recuperação.

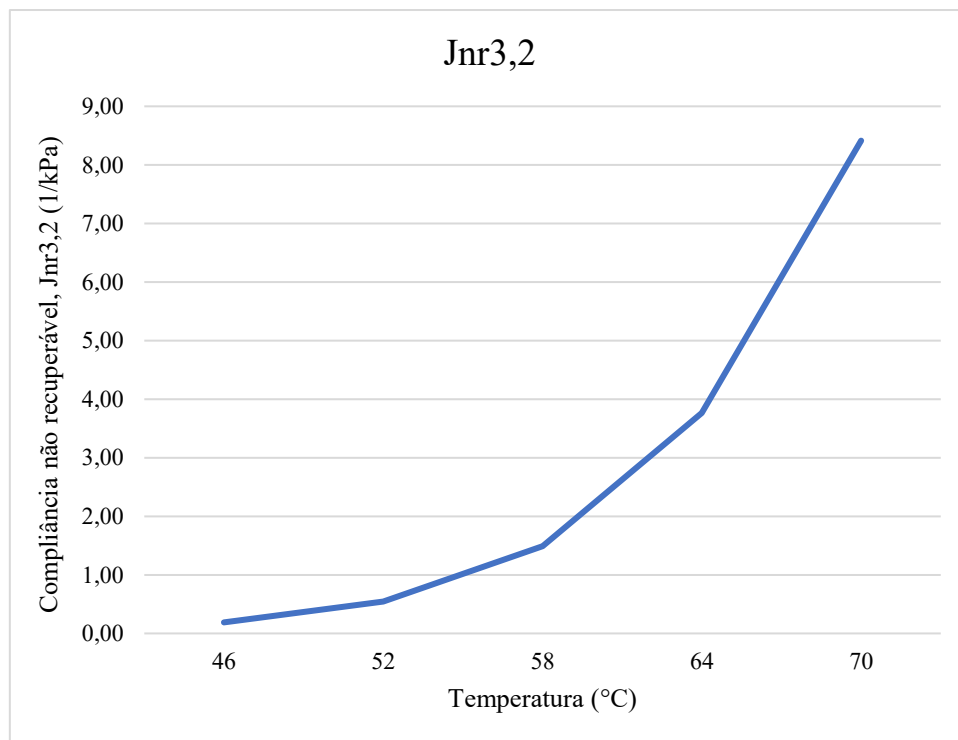


Figura 4.7. Variação do $J_{nr3,2}$ em relação a temperatura.

Observa-se que quanto maior a temperatura maior a deformação permanente acumulada.

Já na Figura 4.8 apresenta a sensibilidade ao aumento de carga na deformação permanente (Jnr_{diff}), ou seja, quanto maior o valor, mais o ligante perderá performance com o aumento da carga de tráfego.

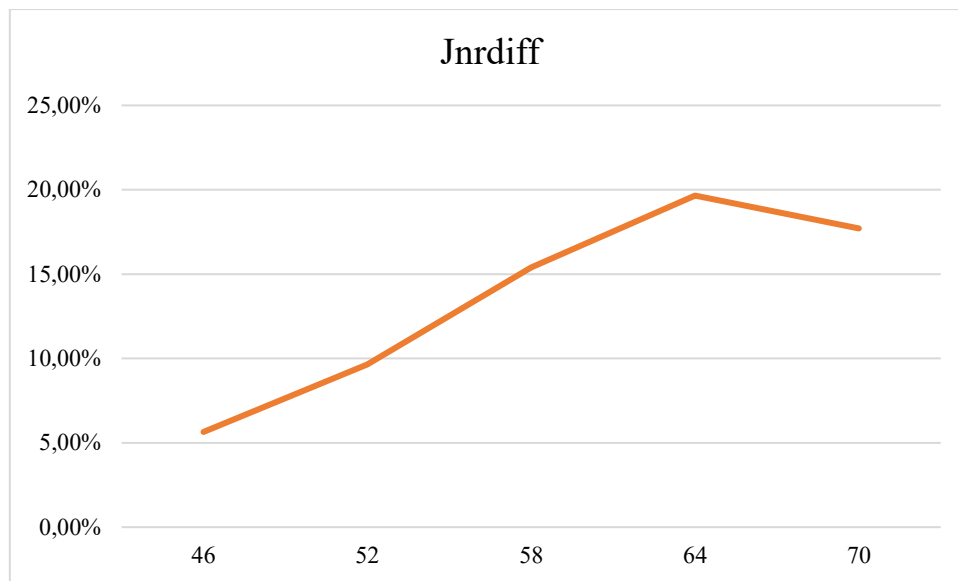


Figura 4.8. Susceptibilidade da deformação permanente ao aumento de carga em relação a temperatura.

É observado que o aumento de temperatura resulta em uma maior diferença na deformação permanente da carga menor (0,1 kPa) em relação a carga maior (3,2 kPa). É importante também observar que os valores estão bem abaixo do máximo permitido na norma americana AASHTO M 332 (ASSHTO, 2022) de 75%.

Essa mesma norma permite reclassificar o PG do ligante para incluir também o tráfego na classificação de performance. O ligante CAP 50/70 aqui estudado pode ser reclassificado como **PG 64S-XX**, uma vez que a 64 °C ele apresenta Jnr_{3,2} de 3,76 1/kPa, o que é superior ao máximo determinado para os tráfegos “H”, “V” e “E” da classificação de tráfego da AASHTO. O ligante classificado como PG 64S-XX pode ser aplicado em rodovias com tráfego AASHTO *Standard*, o que se traduz em um tráfego de até 10 milhões de passagens do eixo padrão durante a vida útil da rodovia. Essa informação permite qualificar o ligante estudado para uso no segmento experimental uma vez que o tráfego na via é menor que os 10 milhões determinados em norma.

4.3.8 Linear Amplitude Sweep (LAS)

Seguindo a teoria VECD, e com auxílio da planilha disponibilizada pelo MARC – *Modified Asphalt Research Center*, foram encontrados os parâmetros da equação que ajusta os dados experimentais a lei da fadiga para o CAP 50/70 ensaiado. Esse ensaio foi executado em dois corpos de prova da mesma amostra e os resultados estão na Tabela 4.24.

Tabela 4.24. Resultados dos coeficientes que compõem a equação da vida de fadiga para o ligante CAP 50/70 estudado.

Amostra	A	B
1	$2,661 \times 10^6$	-4,974
2	$4,545 \times 10^6$	-4,927
Média	$3,603 \times 10^6$	-4,951

Com esses dados é possível gerar um gráfico da vida de fadiga (Figura 4.9) de acordo com a deformação cisalhante que sofrida pelo ligante.

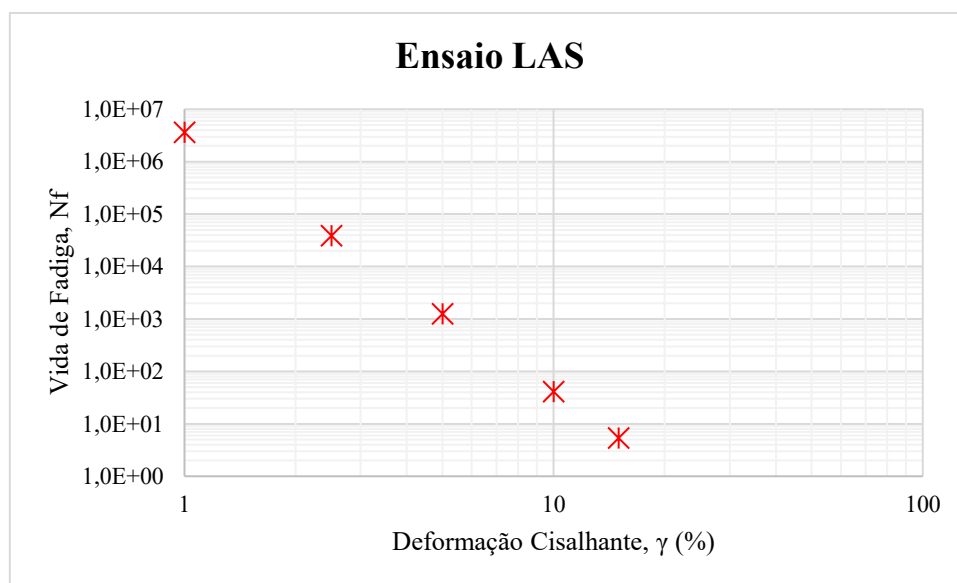


Figura 4.9. Vida de fadiga N_f em função dos valores de deformação cisalhante (γ).

Os números encontrados de vida de fadiga para esta amostra estudada apresentam resultados melhores, ou seja, com maior vida de fadiga, que outras amostras de CAP 50/70 encontradas nas referências bibliográficas, incluindo amostras de CAP 50/70 estudadas no mesmo DSR (Nunes, 2022).

Observando que o ligante estudado segue todas as exigências mínimas requeridas pelas especificações técnicas e que o estudo com os ensaios no DSR determinou que o ligante está de acordo com o esperado para um CAP 50/70, pode-se afirmar que o ligante asfalto presente na mistura executada no segmento experimental é de boa qualidade e não apresenta contrapontos para o seu uso na obra em questão.

4.4 PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DAS MISTURAS

Foram estudadas duas misturas produzidas com o mesmo CAP 50/70 e mesmos agregados minerais provenientes da coleta em campo no segmento experimental em Roraima. Como a principal diferença encontrada entre o projeto usado na camada de revestimento do segmento experimental e as características das placas extraídas é a porcentagem de ligante asfáltico, as duas misturas a serem estudadas possuem a mesma curva granulométrica, diferindo somente na quantidade de ligante usando durante a mistura.

As características para confecção dos corpos de prova para cada mistura estão apresentadas na Tabela 4.25.

Tabela 4.25. Propriedades de cada uma das misturas estudadas.

Propriedade	Mistura A	Mistura B
Massa Específica Relativa Máxima (g/cm ³)	2,472	2,523
Porcentagem de Asfalto (%)	5,27	4,56
Massa Específica Relativa Aparente (g/cm ³)	2,387	2,413
Volume de Vazios (%)	3,42	4,36
Vazios no Agregado Mineral (%)	16,79	15,30
Relação Betume Vazios (%)	79,65	71,40
Temperatura de Mistura (°C)		155
Temperatura de Compactação (°C)		142

Como já informado no capítulo anterior, a Mistura A é a mistura executada no segmento experimental e a Mistura B é a que foi definida para ser executada de acordo com o projeto.

4.5 ENSAIOS DE DESEMPENHO DA MISTURA ASFÁLTICA

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência e vida de fadiga para as duas misturas estudadas.

4.5.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Esse ensaio foi realizado em 3 réplicas para cada uma das misturas, os resultados para a mistura A estão na Tabela 4.26 e para mistura B estão na Tabela 4.27.

Tabela 4.26. Resultados para o ensaio de resistência à tração da Mistura A

CP	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força de Ruptura (kgf)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência Média (MPa)
A-1	99,85	64,16	1151,0	1,122	
A-2	99,91	63,98	1161,0	1,134	1,123
A-3	99,89	64,18	1142,0	1,112	

Tabela 4.27. Resultados para o ensaio de resistência à tração da Mistura B

CP	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força de Ruptura (kgf)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência Média (MPa)
B-1	99,80	65,96	1329,0	1,261	
B-2	99,78	65,10	1352,0	1,300	1,294
B-3	99,86	65,77	1388,0	1,320	

Observa-se que a Mistura A, que possui maior teor de ligante, apresentou uma menor resistência à tração que a Mistura B. A Mistura A possui RT 15% maior que a mistura com mais teor de ligante asfáltico. Esse resultado é esperado uma vez que a Mistura A, pelo excesso de ligante, pode interferir no intertravamento da estrutura de agregados minerais e diminuir sua resistência.

4.5.2 Módulo de Resiliência

No ensaio do módulo de resiliência cada corpo de prova foi submetido três tensões diferentes (15% da RT, 20% da RT e 25% da RT) por 15 ciclos de 1 Hz, para determinação de cada MR foram feitas as médias dos 5 últimos ciclos.

O ensaio de módulo de resiliência também foi feito com réplicas triplicadas para ambas as misturas em estudo. Os resultados da amostra A estão na Tabela 4.28.

Tabela 4.28. Resultados de MR para a Mistura A

CP	% da RT	Carga Cíclica (MPa)	Módulo de Resiliência (MPa)	CV (%)
A-4	15%	0,169	3224,26	0,77
A-4	20%	0,225	3084,79	0,41
A-4	25%	0,281	2943,77	0,28
A-5	15%	0,169	3388,47	1,73
A-5	20%	0,225	3308,54	1,64
A-5	25%	0,281	3182,31	1,04
A-6	15%	0,169	3275,44	1,11
A-6	20%	0,225	3187,10	0,91
A-6	25%	0,281	3014,54	0,87
Média	15%	0,169	3296,06	1,20
	20%	0,225	3193,48	0,99
	25%	0,281	3046,87	0,73
Média Total			3178,80	

Os resultados para a amostra B estão na Tabela 4.29

Tabela 4.29. Resultados de MR para a Mistura B

CP	% da RT	Carga Cíclica (MPa)	Módulo de Resiliência (MPa)	CV (%)
A-4	15%	0,194	4088,51	2,62
A-4	20%	0,259	3957,12	2,15
A-4	25%	0,324	3816,78	0,91
A-5	15%	0,194	4243,98	1,45
A-5	20%	0,259	4092,43	1,17
A-5	25%	0,324	3801,16	1,09
A-6	15%	0,194	4115,75	4,71
A-6	20%	0,259	4098,82	3,34
A-6	25%	0,324	3921,27	1,45
	15%	0,194	4149,41	2,93
Média	20%	0,259	4049,46	2,22
	25%	0,324	3846,40	1,15
Média Total			4015,09	

Os resultados de módulo de resiliência obtidos mostram-se coerentes com o comportamento esperado para misturas asfálticas densas com ligante CAP 50/70. Observa-se que a Mistura B, com menor teor de ligante, apresentou maior rigidez, com módulo de resiliência de 4015,09 MPa, enquanto a Mistura A, com maior teor de ligante, apresentou módulo de 3178,80 MPa. A

Mistura B apresentou uma melhoria de 26,3% no MR quando se adequou a mistura ao que foi projetado para execução.

O comportamento é consistente, uma vez que uma mistura com maior densidade atrelado a uma quantidade de ligante proveniente da dosagem resultam em uma boa mistura que onde o contato agregado-agregado prevalece, resultando em misturas mais rígidas. Ainda assim, ambos os valores se encontram dentro da faixa típica reportada para misturas asfálticas densas, indicando que os materiais analisados apresentam comportamento mecânico compatível com o esperado para CAUQ.

4.5.3 Vida de Fadiga

A vida de fadiga foi determinada por meio do ensaio de compressão diametral a tensão controlada. O ensaio de fadiga foi realizado em 12 corpos de prova nos níveis de tensões de 40%, 35%, 30% e 20% da resistência à tração tanto na Mistura A, quanto na Mistura B.

Na Tabela 4.30 Tabela 4.30. Resultado da vida de fadiga para a Mistura A apresentam-se os resultados para vida de fadiga de cada um dos corpos de prova da Mistura A.

Tabela 4.30. Resultado da vida de fadiga para a Mistura A

CP	Alt. (mm)	Diâm. (mm)	Nível de Tensão (% de RT)	Carga Aplicada (N)	Tensão Aplicada (MPa)	Módulo de Resiliência (MPa)	Deformação Específica Resiliente	Diferença de Tensões (MPa)	Nf
A-7	65,12	99,79	40	3781,24	0,3704	3179	0,000117	1,48	2874
A-8	64,87	99,64	35	3512,77	0,3460	3179	0,000109	1,38	5124
A-9	65,22	99,87	30	3132,97	0,3062	3179	0,000096	1,22	9417
A-10	64,67	99,97	20	1965,14	0,1935	3179	0,000061	0,77	81245
A-11	64,75	99,84	40	3821,15	0,3763	3179	0,000118	1,51	2451
A-12	65,03	99,89	35	3812,22	0,3736	3179	0,000118	1,49	6214
A-13	64,7	99,73	30	3415,62	0,3370	3179	0,000106	1,35	9264
A-14	64,83	99,61	20	1995,32	0,1967	3179	0,000062	0,79	112454
A-15	65,2	99,68	40	4311,22	0,4223	3179	0,000133	1,69	2166

A-16	64,69	99,87	35	3914,16	0,3857	3179	0,000121	1,54	5386
A-17	64,89	99,91	30	3421,26	0,3360	3179	0,000106	1,34	9032
A-18	65	99,85	20	2274,17	0,2231	3179	0,000070	0,89	110245

Para utilizar esses resultados em análises computacionais no MeDiNa é necessário primeiramente encontrar os coeficientes k_1 e k_2 das curvas de fadiga, por meio de um regressão exponencial, para tal foram plotados os gráficos com o resultado da Mistura A na Figura 4.10 e na Figura 4.11 no Excel e feito a regressão exponencial.

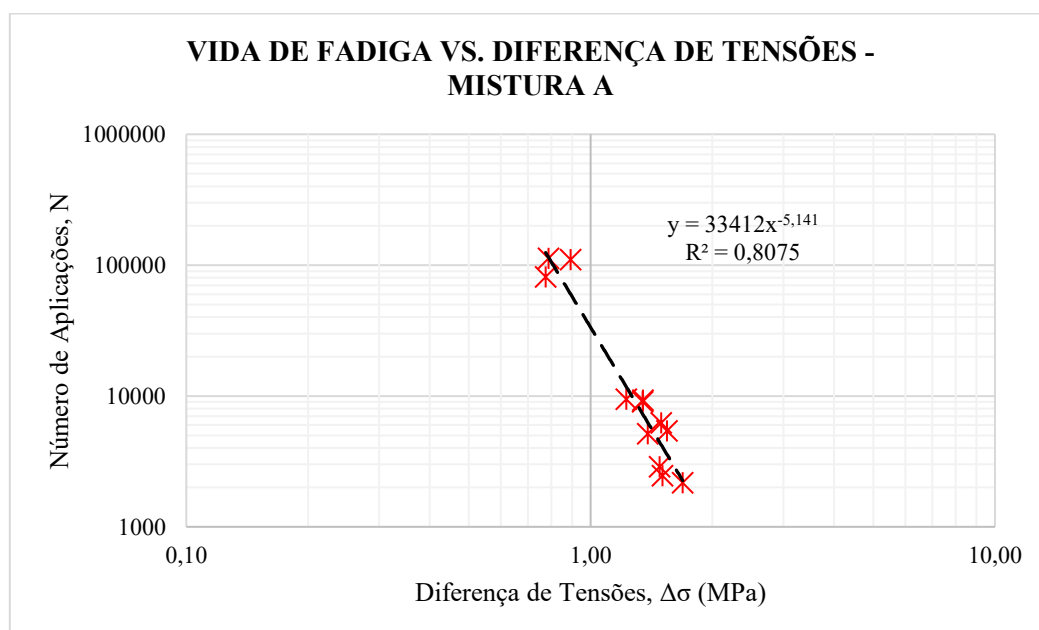


Figura 4.10. Gráfico da vida de fadiga em função da diferença de tensões $\Delta\sigma$ para Mistura A.

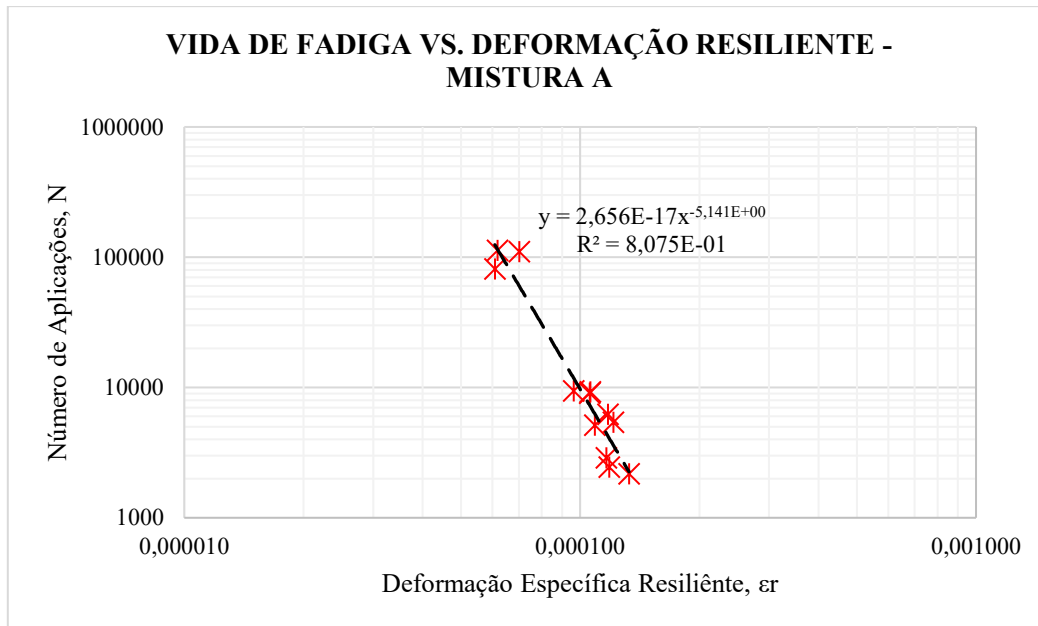


Figura 4.11. Gráfico da vida de fadiga em função da deformação resiliente (ϵ_r) para Mistura A.

Na Tabela 4.31 Tabela 4.30. Resultado da vida de fadiga para a Mistura A apresentam-se os resultados para vida de fadiga de cada um dos corpos de prova da Mistura A.

Tabela 4.31. Resultado da vida de fadiga para a Mistura B

CP	Alt. (mm)	Diâm. (mm)	Nível de Tensão (% de RT)	Carga Aplicada (N)	Tensão Aplicada (MPa)	Módulo de Resiliência (MPa)	Deformação Específica Resiliente	Diferença de Tensões (MPa)	Nf
B-7	64,77	99,91	40	3845,11	0,37827	4015	0,000094	1,51	5258
B-8	64,91	99,8	35	3488,14	0,34279	4015	0,000085	1,37	7615
B-9	65,22	99,73	30	3121,41	0,30551	4015	0,000076	1,22	15975
B-10	64,1	99,98	20	1961,44	0,19484	4015	0,000049	0,78	112054
B-11	64,82	99,57	40	4631,72	0,45686	4015	0,000114	1,83	2264
B-12	64,55	99,93	35	3879,16	0,38285	4015	0,000095	1,53	5114
B-13	65,09	99,62	30	3101,06	0,30446	4015	0,000076	1,22	8366
B-14	64,63	99,75	20	1856,16	0,18329	4015	0,000046	0,73	124661
B-15	64,89	99,92	40	4811,62	0,47243	4015	0,000118	1,89	2154
B-16	65,22	99,84	35	3905,26	0,38181	4015	0,000095	1,53	5023

B-17	65,25	99,8	30	3211,16	0,31393	4015	0,000078	1,26	8467
B-18	64,98	99,73	20	2031,00	0,19952	4015	0,000050	0,80	115574

Mais uma vez foram plotados os gráficos com o resultado da Mistura B na Figura 4.14 e na Figura 4.15 no Excel e feito a regressão exponencial.

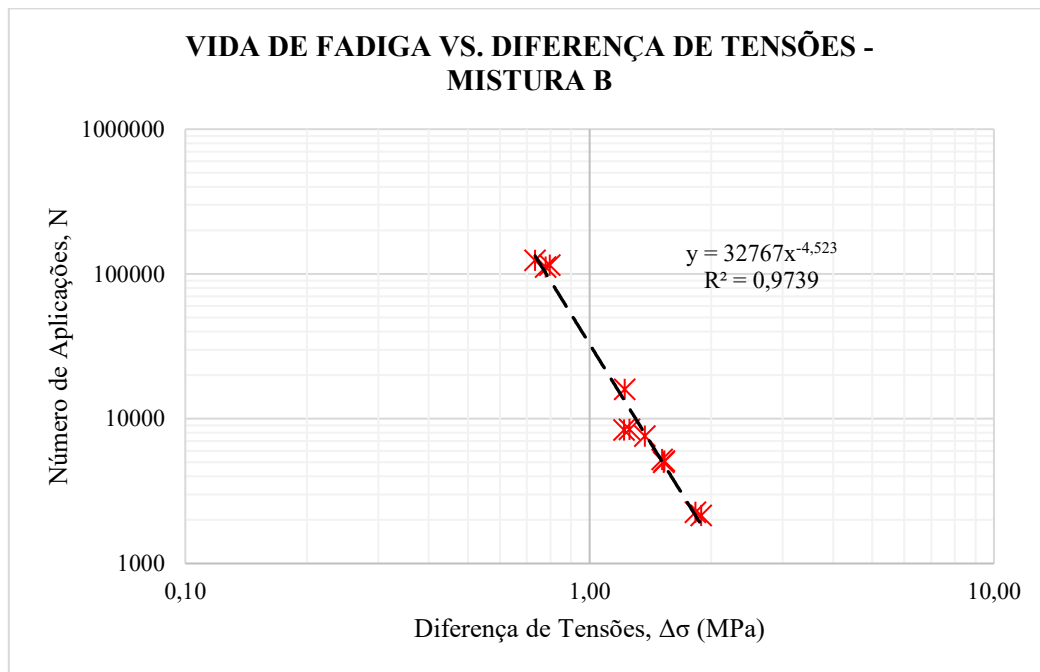


Figura 4.12. Gráfico da vida de fadiga em função da diferença de tensões $\Delta\sigma$ para Mistura B.

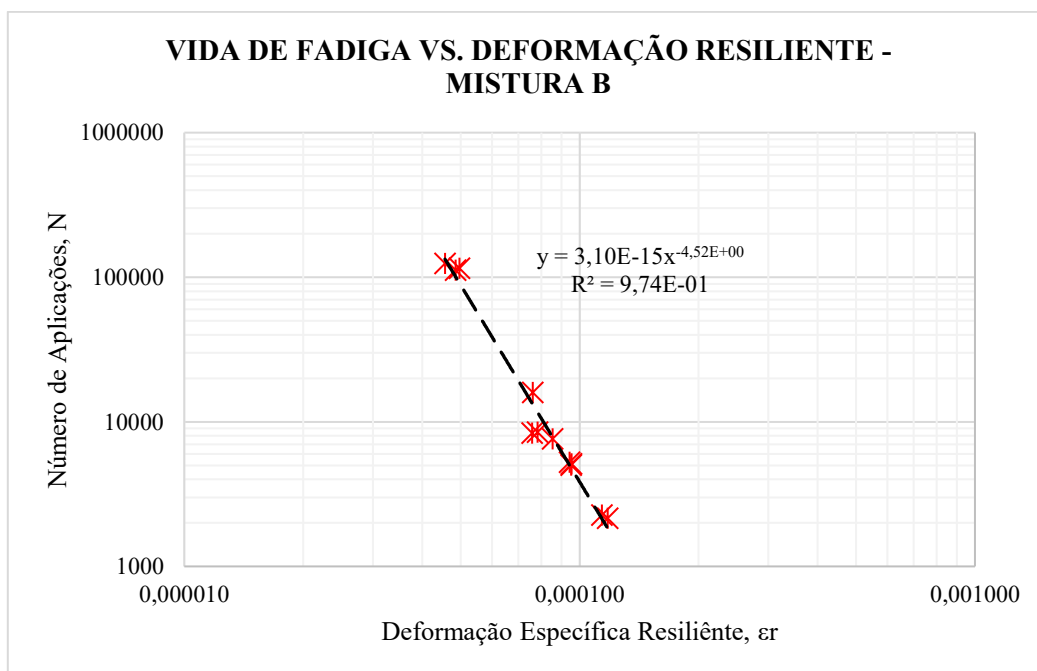


Figura 4.13. Gráfico da vida de fadiga em função da deformação resiliente (ϵ_r) para Mistura B.

Observa-se que a Mistura B apresenta vida de fadiga maior que a da Mistura A, o que pode ser contraintuitivo, uma vez que a Mistura A possui maior teor de ligante e conseqüentemente possui mais flexibilidade reduzindo sua rigidez e diminuindo a propagação de microfissuras.

Todavia, é bom lembrar que a Mistura B é resultado de um processo de dosagem feita durante a fase de projeto da obra, seu teor de ligante é o ótimo e adição a mais de CAP pode provocar excesso de deformação permanente sob cargas cíclicas, uma vez que o esqueleto mineral perde sua eficiência em teores de ligantes muito excessivos. Com essa linha de raciocínio é possível entender a variação do N_f encontrado nos ensaios de vida de fadiga.

Além disso, observa-se que o R^2 encontrado para ambas as curvas é muito próximo de 1, o que evidencia a qualidade do ensaio.

Por fim, na Tabela 4.32 estão os coeficientes de ajuste das curvas para de cada uma das misturas.

Tabela 4.32. Coeficientes de ajuste da curva de vida de fadiga.

Mistura	Deformação Resiliente Específica		Diferença de Tensões	
	K_1	K_2	K_1	K_2
A	$2,66 \times 10^{-17}$	-5,141	33412	-5,141
B	$3,10 \times 10^{-15}$	-4,523	32767	-4,523

4.6 ANÁLISES COMPUTACIONAIS

Nesta seção serão feitas as análises mecanístico-empíricas no *software* MeDiNa e AEMC versão 2.0.0 em diferentes cenários.

4.6.1 Cálculo do Número “N”

Para o cálculo de tráfego, foram utilizadas contagens feitas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) por meio do Plano Nacional de Contagem de Tráfego na região próxima ao segmento experimental. Na Tabela 4.33 está apresentado o número de passagens do eixo padrão para cada tipo de veículo no ano de 2024.

Tabela 4.33. Número de passagens do eixo padrão nos 12 meses de 2024 (Fonte: DNIT).

Sentido	Crescente	Decrescente
Nº Faixas	1	1
A (2 eixos)	113	99
B (3 eixos)	42	37
C (4 eixos)	46	40
D (5 eixos)	46	40
E (6 eixos)	57	50
F (7 eixos)	27	24
G (8 eixos)	3	2
H (9 eixos)	42	37
I (passeio)	910	994
J (moto)	72	79
VMDa	1358	1402

Esse estudo resultou em Volume Médio Diário Anual (VMDa) de passagens do eixo padrão (8,2t de carga) de 1.380. Esse VMDa com taxa de crescimento de 3% ao ano para um projeto com vida útil de 10 anos resultou em um número N de $5,77 \times 10^6$.

4.6.2 Cenários

A Tabela 4.34 relembra quais são os cenários definidos no Capítulo 3 que irão ser analisados no *software*.

Tabela 4.34. Cenários a serem analisados no MeDiNa.

Cenário	#
MA-G1-OT	Revestimento com 5,27% de ligante asfáltico, revestimento com 5 cm, base com 15 cm, sub-base com 15 cm e subleito compactado no ponto de umidade ótima.
MB-G1-OT	Revestimento com 4,56% de ligante asfáltico, revestimento com 5 cm, base com 15 cm, sub-base com 15 cm e subleito compactado no ponto de umidade ótima.
MA-G2-OT	Revestimento com 5,27% de ligante asfáltico, revestimento com 5 cm, sub-base com 30 cm e subleito compactado no ponto de umidade ótima.
MA-G3-OT	Revestimento com 5,27% de ligante asfáltico, revestimento com 5 cm, sub-base com 20 cm e subleito compactado no ponto de umidade ótima.
MA-G1-COM+2%	Revestimento com 5,27% de ligante asfáltico, revestimento com 5 cm, base com 15 cm, sub-base com 15 cm e subleito compactado num ponto 2% maior que o ótimo.
MA-G1-COM-2%	Revestimento com 5,27% de ligante asfáltico, revestimento com 5 cm, base com 15 cm, sub-base com 15 cm e subleito compactado num ponto 2% menor que o ótimo.
MA-G1-PÓS+2%	Revestimento com 5,27% de ligante asfáltico, revestimento com 5 cm, base com 15 cm, sub-base com 15 cm e subleito compactado no ponto ótimo, mas passou por um processo de molhagem após a compactação para aumentar sua umidade em 2%
MA-G1-PÓS-2%	Revestimento com 5,27% de ligante asfáltico, revestimento com 5 cm, base com 15 cm, sub-base com 15 cm e subleito compactado no ponto ótimo, mas passou por um processo de secagem após a compactação para diminuir sua umidade em 2%

4.6.3 Parâmetros de Entrada no MeDiNa

O primeiro passo para fazer as análises computacionais é agrupar todos os parâmetros a serem inseridos como entrada no MeDiNa.

A Tabela 4.35 apresenta os dados para a camada de revestimento.

Tabela 4.35. Parâmetros de entrada no MeDiNa para camada de revestimento (Fonte: Autor)

CP	Módulo de Resiliência (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Massa Específica (g/cm ³)	Fadiga	
				k1	k2
MA	3178,80	1,123	2,387	2,66x10 ⁻¹⁷	-5,141
MB	4015,09	1,294	2,413	3,10x10 ⁻¹⁵	-4,523

A Tabela 4.36 apresenta os parâmetros de entrada para a camada de base e sub-base, resultados foram obtidos por Caetano (2024).

Tabela 4.36. Dados de entrada para as camadas de base e sub-base. (Fonte: Caetano, 2024)

Material	Módulo de Resiliência			Deformação Permanente				Massa Específica (g/cm ³)
	k1	k2	k3	Ψ ₁	Ψ ₂	Ψ ₃	Ψ ₄	
BS-SE	1000,08	0,315	-0,008	0,7098	-0,3161	1,1630	0,0303	2,061
SB-SE	561,40	0,279	0,558	0,1186	0,3725	0,7771	0,0497	1,942

Já a Tabela 4.37 exhibe os parâmetros de entrada do programa para a camada de sub-leito com resultados de Cardoso (2024).

Tabela 4.37. Dados de entrada para camada de subleito. (Fonte: Cardoso, 2024)

Umidade	Módulo de Resiliência			Deformação Permanente				Massa Específica (g/cm ³)
	k ₁	k ₂	k ₃	Ψ ₁	Ψ ₂	Ψ ₃	Ψ ₄	
OT	471,89	0,395	-0,120	0,1132	0,3402	1,2420	0,0453	1,999
COM+2%	338,24	0,365	-0,115	0,057	-0,479	0,981	-0,021	1,999
COM-2%	2126,45	0,467	-0,003	0,239	-0,657	0,632	0,009	1,999
POS+2%	476,45	0,389	-0,075	0,057	-0,479	0,981	-0,021	1,999
POS-2%	2500,97	0,414	0,024	0,239	-0,657	0,632	0,009	1,999

É importante ressaltar que não há dados para deformação permanente de corpo de prova compactados na umidade ótimo para posterior aplicação de ciclos de secagem e molhagem (POS+2% e POS-2%), dessa forma os parâmetros de entrada para esses casos foi o mesmo usado para corpos de prova compactados na 2% a mais e menos da umidade ótima.

4.6.4 Efeito da Camada de Revestimento

Para comparar o que era esperado em projeto do segmento experimental e o que foi realmente executado, as primeiras análises serão dos cenários MA-G1-OT e MB-G1-OT.

Na Tabela 4.38 estão apresentados para o cenário MA-G1-OT a evolução do Afundamento da Trilha de Roda (ATR) e da área trincada por fadiga, que são as patologias usadas pelo MeDiNa para determinar falha da estrutura.

Tabela 4.38. Evolução das patologias para o cenário MA-G1-OT

Tempo (meses)	Passagens do Eixo Padrão	Área Trincada (%)	Afundamento da Trilha de Roda (mm)
1	4,14E+04	0,02%	8,04
6	2,50E+05	0,04%	8,49
12	5,04E+05	0,06%	8,67
18	7,61E+05	0,11%	8,78

24	1,02E+06	0,17%	8,86
30	1,29E+06	0,26%	8,92
36	1,56E+06	0,40%	8,98
42	1,83E+06	0,58%	9,02
48	2,11E+06	0,83%	9,06
54	2,39E+06	1,17%	9,09
60	2,67E+06	1,62%	9,13
66	2,96E+06	2,24%	9,15
72	3,26E+06	3,08%	9,18
78	3,56E+06	4,25%	9,21
84	3,86E+06	5,88%	9,23
90	4,17E+06	8,13%	9,25
96	4,48E+06	11,21%	9,27
102	4,80E+06	15,29%	9,29
108	5,12E+06	20,46%	9,31
114	5,44E+06	26,79%	9,33
120	5,77E+06	34,19%	9,34

Na Tabela 4.39 são apresentados a evolução das patologias para o cenário MB-G1-OT.

Tabela 4.39. Evolução das patologias para o cenário MB-G1-OT

Tempo (meses)	Passagens do Eixo Padrão	Área Trincada (%)	Afundamento da Trilha de Roda (mm)
1	4,14E+04	0,01%	7,53
6	2,50E+05	0,03%	7,96
12	5,04E+05	0,06%	8,13

18	7,61E+05	0,10%	8,23
24	1,02E+06	0,15%	8,31
30	1,29E+06	0,23%	8,37
36	1,56E+06	0,34%	8,42
42	1,83E+06	0,49%	8,46
48	2,11E+06	0,69%	8,49
54	2,39E+06	0,97%	8,53
60	2,67E+06	1,32%	8,56
66	2,96E+06	1,80%	8,58
72	3,26E+06	2,43%	8,61
78	3,56E+06	3,28%	8,63
84	3,86E+06	4,45%	8,65
90	4,17E+06	6,04%	8,67
96	4,48E+06	8,22%	8,69
102	4,80E+06	11,14%	8,71
108	5,12E+06	14,94%	8,73
114	5,44E+06	19,74%	8,74
120	5,77E+06	25,58%	8,76

Para melhor compreensão e análise, na Figura 4.14 e na Figura 4.15 estão presentes gráficos para comparação da evolução da área trincada do pavimento e do afundamento da trilha de roda, respectivamente.

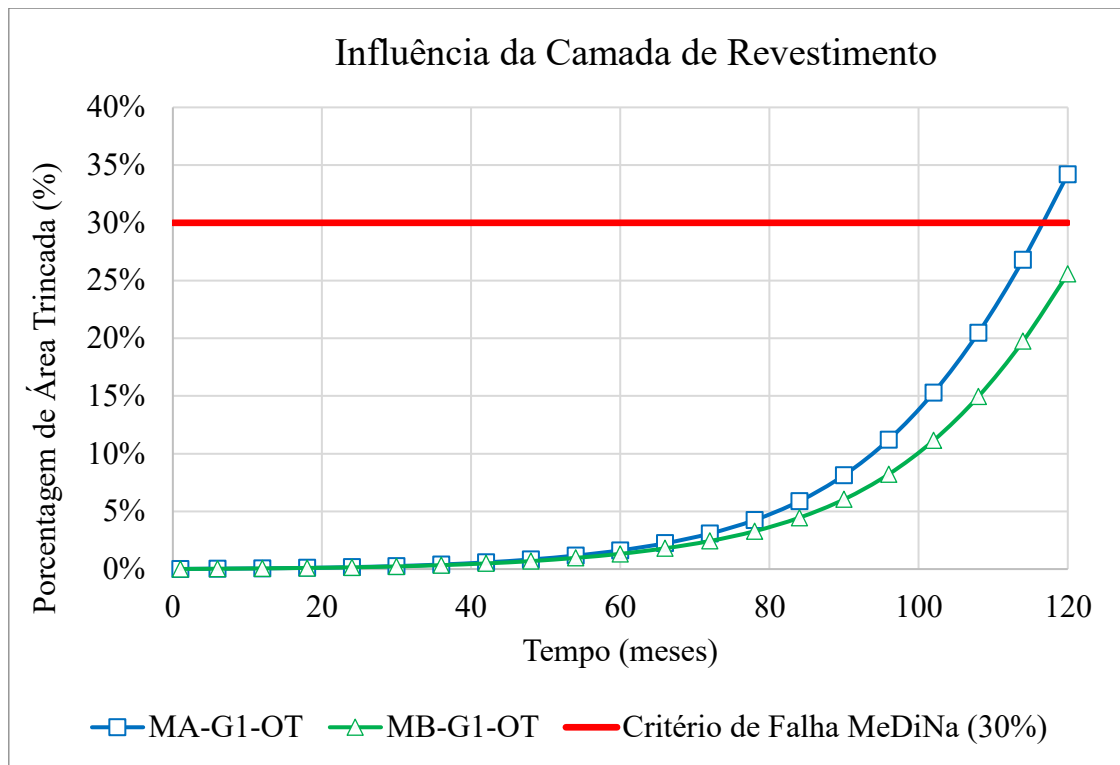


Figura 4.14. Comparação da evolução da área trincada entre os cenários com diferentes camadas de revestimento.

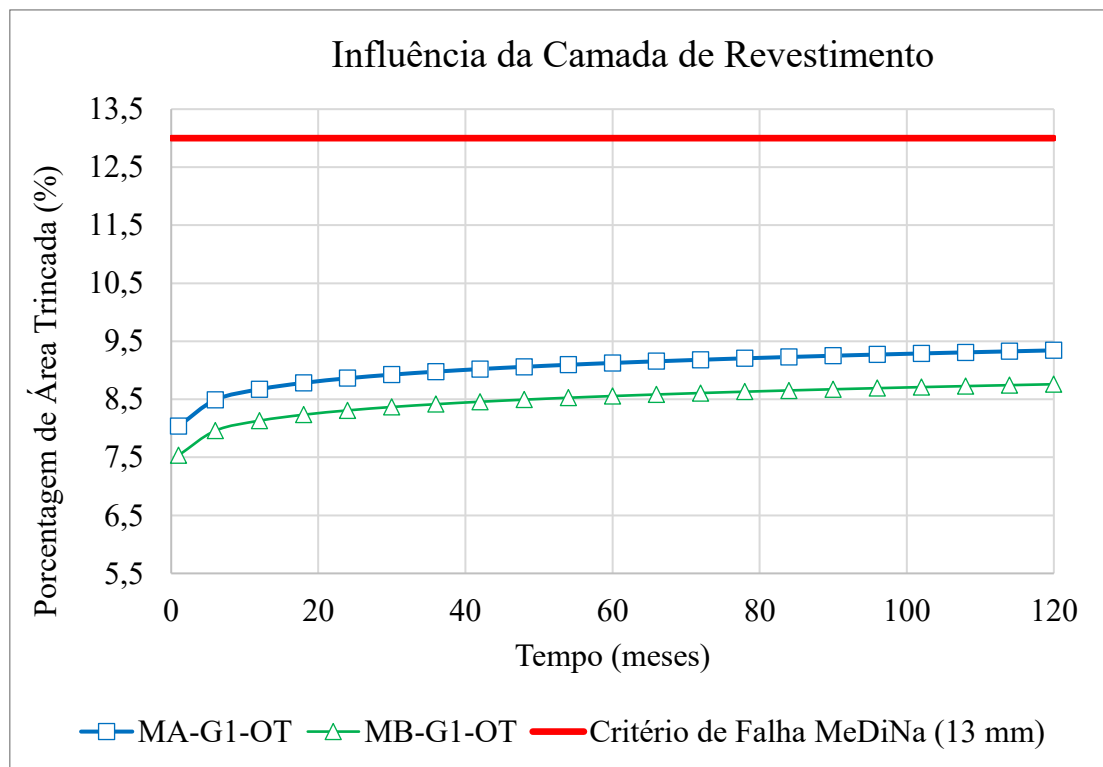


Figura 4.15. Comparação da evolução do afundamento de trilha de roda entre os cenários com diferentes camadas de revestimento.

O cenário que contém a mistura dosada de acordo com o teor ótimo definido em projeto (MB-G1-OT) apresentou uma vida útil maior que o cenário com a mistura que foi realmente executada na pista com excesso de ligante (MA-G1-OT). Considerando o critério de falha do MeDiNa de 30% da área trincada, a vida útil do melhor cenário foi de superou os 120 meses projetados e a do pior cenário foi de cerca de 117 meses.

É interessante observar, que a diferença entre a área trincada final dos dois cenários é pequena, demonstrando que a má execução da camada de revestimento tem efeitos adversos, porém contidos. No cenário com a mistura realmente executada no segmento experimental constatou-se que a estrutura do pavimento não chegou a vida útil esperada, o que é confirmado pelo fato que segmento passou por reconstrução antes do previsto devido ao grande número de patologias desenvolvidas. Já no cenário com a mistura que foi dosada e projetada a ser executada a simulação mostra que a estrutura suporta as carga até o fim de sua vida útil de 10 anos.

Somente por esses dois casos, também, é possível evidenciar que as camadas granulares foram bem projetadas para a geometria 1 (5 cm de revestimento, 15 cm de base e 15 cm de sub-base), uma vez que o afundamento por trilha de roda, característica que depende somente das camadas granulares, ficou muito abaixo do máximo permitido de 13 mm.

4.6.5 Efeito da Geometria da Estrutura

Para comparar qual a diferença na evolução das patologias em cada uma das 3 seções do segmento experimental executado, foi feito a análise mecânica-empírica no MeDiNa para os 3 cenários com geometrias diferentes, MA-G1-OT, MA-G2-OT e MA-G3-OT.

Na Tabela 4.40 estão apresentados para o cenário MA-G2-OT a evolução do Afundamento da Trilha de Roda (ATR) e da área trincada por fadiga, que são as patologias usadas pelo MeDiNa para determinar falha da estrutura.

Tabela 4.40. Evolução das patologias para o cenário MA-G2-OT

Tempo (meses)	Passagens do Eixo Padrão	Área Trincada (%)	Afundamento da Trilha de Roda (mm)
1	4,14E+04	0,03%	0,63
6	2,50E+05	0,13%	0,69
12	5,04E+05	0,53%	0,72

18	7,61E+05	1,61%	0,73
24	1,02E+06	4,36%	0,74
30	1,29E+06	11,56%	0,75
36	1,56E+06	26,96%	0,76
42	1,83E+06	50,20%	0,76
48	2,11E+06	75,02%	0,77
54	2,39E+06	94,64%	0,77
60	2,67E+06	100,00%	0,78
66	2,96E+06	100,00%	0,78
72	3,26E+06	100,00%	0,78
78	3,56E+06	100,00%	0,79
84	3,86E+06	100,00%	0,79
90	4,17E+06	100,00%	0,79
96	4,48E+06	100,00%	0,80
102	4,80E+06	100,00%	0,80
108	5,12E+06	100,00%	0,80
114	5,44E+06	100,00%	0,80
120	5,77E+06	100,00%	0,81

Na Tabela 4.41 são apresentados a evolução das patologias para o cenário MA-G3-OT.

Tabela 4.41. Evolução das patologias para o cenário MA-G3-OT

Tempo (meses)	Passagens do Eixo Padrão	Área Trincada (%)	Afundamento da Trilha de Roda (mm)
1	4,14E+04	0,02%	1,20
6	2,50E+05	0,11%	1,32

12	5,04E+05	0,38%	1,36
18	7,61E+05	1,08%	1,39
24	1,02E+06	2,64%	1,41
30	1,29E+06	6,29%	1,43
36	1,56E+06	14,55%	1,44
42	1,83E+06	29,65%	1,45
48	2,11E+06	50,54%	1,46
54	2,39E+06	72,68%	1,47
60	2,67E+06	91,01%	1,48
66	2,96E+06	100,00%	1,48
72	3,26E+06	100,00%	1,49
78	3,56E+06	100,00%	1,50
84	3,86E+06	100,00%	1,50
90	4,17E+06	100,00%	1,51
96	4,48E+06	100,00%	1,51
102	4,80E+06	100,00%	1,52
108	5,12E+06	100,00%	1,52
114	5,44E+06	100,00%	1,53
120	5,77E+06	100,00%	1,53

Para melhor compreensão e análise, na Figura 4.16 e na Figura 4.17 estão presentes gráficos para comparação da evolução da área trincada do pavimento e do afundamento da trilha de roda, respectivamente.

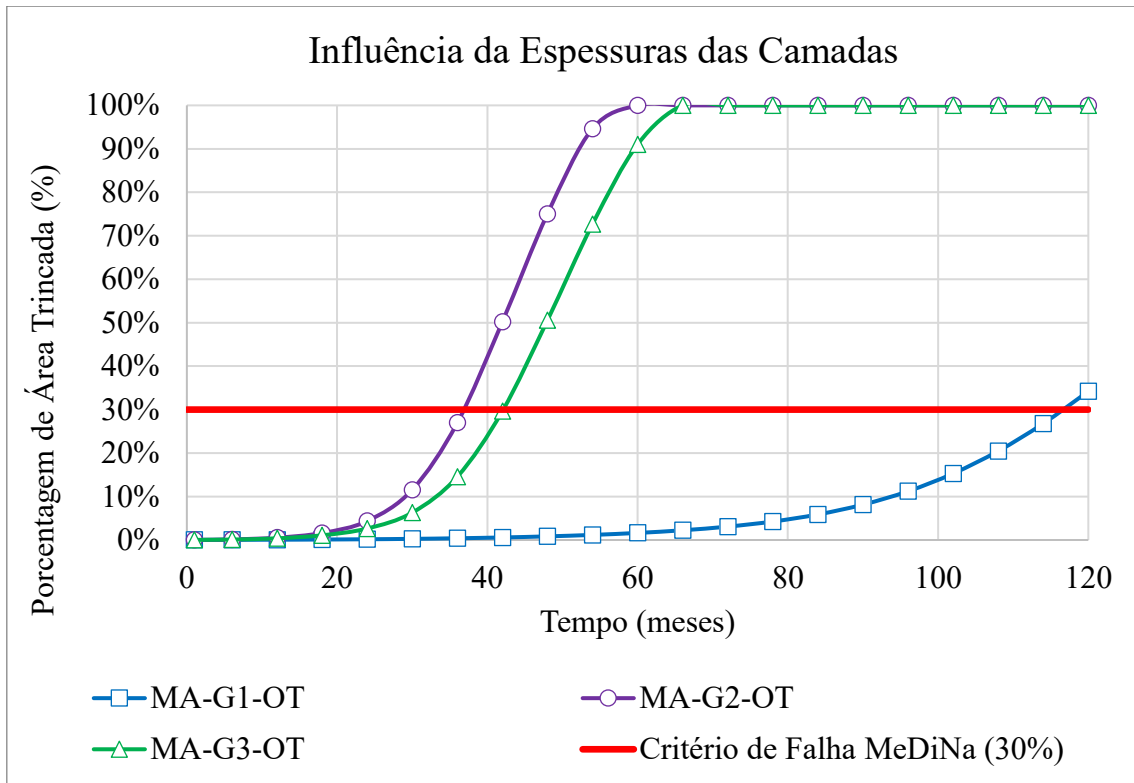


Figura 4.16. Comparação da evolução da área trincada entre os cenários com diferentes geometrias.

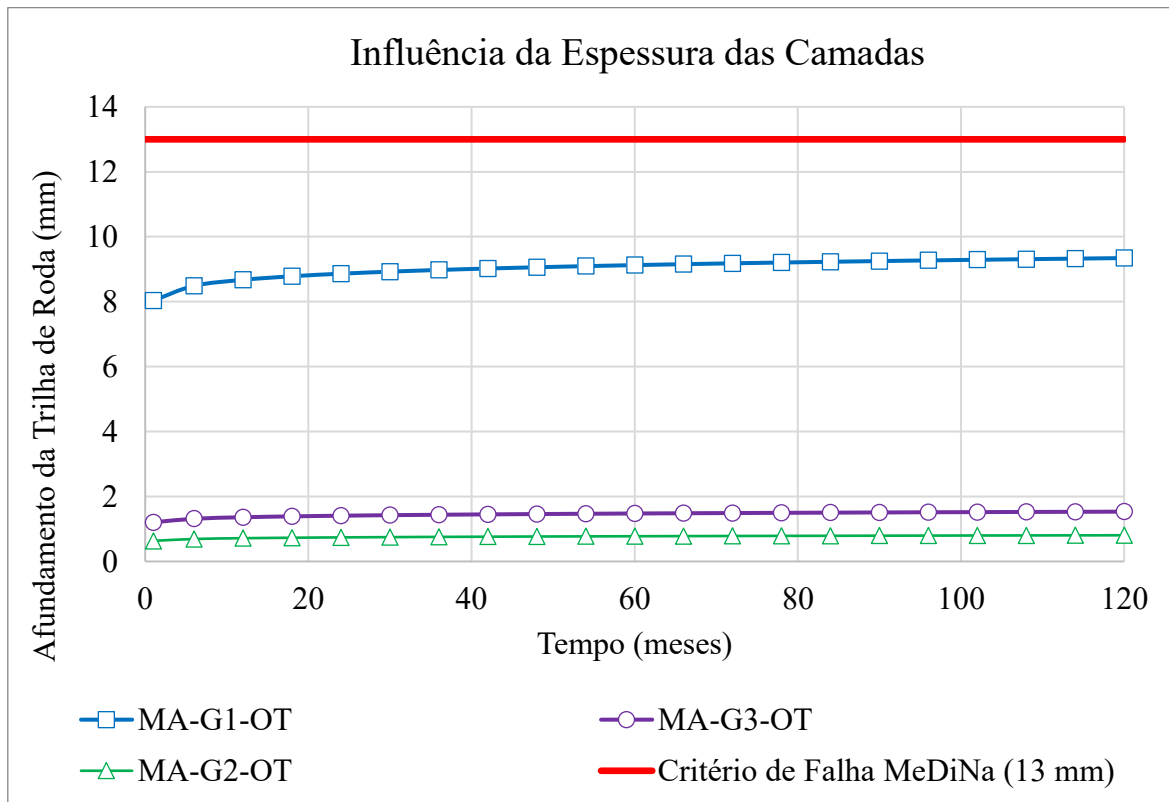


Figura 4.17. Comparação da evolução do afundamento de trilha de roda entre os cenários com diferentes geometrias.

Considerando-se o critério de ruptura do média de 30% da área trincada, o cenário que apresenta estrutura do pavimento com 4 camadas (MA-G1-OT) se destacou em relação aos outros dois cenários, uma vez que sua ruptura a 117 meses é mais que o triplo da vida útil no cenário com 3 camadas com 30 cm de base (MA-G2-OT) que chegou a um pouco mais de 36 meses. Isso é evidência que a espessura total das camadas granulares (30 cm para os dois casos) não é o fator mais importante no dimensionamento de pavimentos, é necessário considerar a rigidez das camadas para que ocorra a dissipação das tensões do tráfego de forma gradativa entre as camadas.

O cenário com uma sub-base com 20 cm de espessura (MA-G3-OT) teve vida útil de mais ou menos 42 meses, um resultado melhor que o cenário com 3 camadas e com uma camada de base maior (MA-G2-OT). E isso, mais uma vez, ajuda a afirmar que quando há grande variação entre a rigidez de duas camadas em sequência (nesse caso a camada de revestimento e a camada de base) o simples aumento da espessura da camada inferior não resolve o problema, é necessário diminuir a espessura das camadas e introduzir materiais com maior rigidez.

E, ainda nessa comparação, é possível ver que a falta da camada de base nos cenários resultou em uma diminuição do afundamento da trilha de roda, isso se dá, pois, grande parte da deformação permanente que ocorre na estrutura do pavimento é proveniente da brita presente na camada de base.

4.6.6 Efeito da Umidade da Camada de Subleito

Para comparar a evolução das patologias em diferentes condições climáticas, foi feita a análise mecanística-empírica no MeDiNa para os 5 cenários com umidades diferentes da camada de subleito, MA-G1-OT, MA-G1-COM+2%, MA-G1-COM-2%, MA-G1-PRO+2% e MA-G1-POS-2%.

Na Tabela 4.42 Tabela 4.40 estão apresentados para o cenário MA-G1-COM+2% a evolução do Afundamento da Trilha de Roda (ATR) e da área trincada por fadiga, que são as patologias usadas pelo MeDiNa para determinar falha da estrutura.

Tabela 4.42. Evolução das patologias para o cenário MA-G1-COM+2%

Tempo (meses)	Passagens do Eixo Padrão	Área Trincada (%)	Afundamento da Trilha de Roda (mm)
1	4,14E+04	0,02%	8,21

6	2,50E+05	0,04%	8,65
12	5,04E+05	0,07%	8,83
18	7,61E+05	0,11%	8,94
24	1,02E+06	0,19%	9,01
30	1,29E+06	0,29%	9,07
36	1,56E+06	0,45%	9,13
42	1,83E+06	0,66%	9,17
48	2,11E+06	0,96%	9,21
54	2,39E+06	1,36%	9,24
60	2,67E+06	1,91%	9,27
66	2,96E+06	2,67%	9,30
72	3,26E+06	3,74%	9,33
78	3,56E+06	5,24%	9,35
84	3,86E+06	7,37%	9,37
90	4,17E+06	10,33%	9,39
96	4,48E+06	14,31%	9,41
102	4,80E+06	19,49%	9,43
108	5,12E+06	25,90%	9,45
114	5,44E+06	33,49%	9,47
120	5,77E+06	42,06%	9,48

Na Tabela 4.43 são apresentados a evolução das patologias para o cenário MA-G1-COM-2%.

Tabela 4.43. Evolução das patologias para o cenário MA-G1-COM-2%

Tempo (meses)	Passagens do Eixo Padrão	Área Trincada (%)	Afundamento da Trilha de Roda (mm)
----------------------	---------------------------------	--------------------------	---

1	4,14E+04	0,01%	15,94
6	2,50E+05	0,03%	16,52
12	5,04E+05	0,05%	16,76
18	7,61E+05	0,09%	16,90
24	1,02E+06	0,13%	17,00
30	1,29E+06	0,19%	17,08
36	1,56E+06	0,28%	17,15
42	1,83E+06	0,40%	17,21
48	2,11E+06	0,56%	17,26
54	2,39E+06	0,77%	17,30
60	2,67E+06	1,04%	17,34
66	2,96E+06	1,39%	17,38
72	3,26E+06	1,85%	17,41
78	3,56E+06	2,45%	17,44
84	3,86E+06	3,24%	17,47
90	4,17E+06	4,31%	17,50
96	4,48E+06	5,74%	17,52
102	4,80E+06	7,66%	17,55
108	5,12E+06	10,19%	17,57
114	5,44E+06	13,46%	17,59
120	5,77E+06	17,59%	17,62

Na Tabela 4.44 são apresentados a evolução das patologias para o cenário MB-G1-POS+2%.

Tabela 4.44. Evolução das patologias para o cenário MA-G1-POS+2%

Tempo (meses)	Passagens do Eixo Padrão	Área Trincada (%)	Afundamento da Trilha de Roda (mm)
1	4,14E+04	0,02%	8,21
6	2,50E+05	0,04%	8,65
12	5,04E+05	0,07%	8,83
18	7,61E+05	0,11%	8,94
24	1,02E+06	0,18%	9,01
30	1,29E+06	0,27%	9,07
36	1,56E+06	0,41%	9,13
42	1,83E+06	0,61%	9,17
48	2,11E+06	0,87%	9,21
54	2,39E+06	1,23%	9,24
60	2,67E+06	1,71%	9,27
66	2,96E+06	2,37%	9,30
72	3,26E+06	3,27%	9,33
78	3,56E+06	4,54%	9,35
84	3,86E+06	6,31%	9,37
90	4,17E+06	8,77%	9,39
96	4,48E+06	12,12%	9,41
102	4,80E+06	16,53%	9,43
108	5,12E+06	22,08%	9,45
114	5,44E+06	28,81%	9,47
120	5,77E+06	36,60%	9,48

E, por fim, Tabela 4.45 são apresentados a evolução das patologias para o cenário MB-G1-POS-2%.

Tabela 4.45. Evolução das patologias para o cenário MA-G1-POS-2%

Tempo (meses)	Passagens do Eixo Padrão	Área Trincada (%)	Afundamento da Trilha de Roda (mm)
1	4,14E+04	0,01%	15,94
6	2,50E+05	0,03%	16,52
12	5,04E+05	0,06%	16,76
18	7,61E+05	0,09%	16,90
24	1,02E+06	0,14%	17,00
30	1,29E+06	0,20%	17,08
36	1,56E+06	0,30%	17,15
42	1,83E+06	0,43%	17,21
48	2,11E+06	0,60%	17,26
54	2,39E+06	0,82%	17,30
60	2,67E+06	1,11%	17,34
66	2,96E+06	1,50%	17,38
72	3,26E+06	2,00%	17,41
78	3,56E+06	2,66%	17,44
84	3,86E+06	3,54%	17,47
90	4,17E+06	4,73%	17,50
96	4,48E+06	6,35%	17,52
102	4,80E+06	8,51%	17,55
108	5,12E+06	11,36%	17,57
114	5,44E+06	15,03%	17,59

120	5,77E+06	19,62%	17,62
-----	----------	--------	-------

Para melhor compreensão e análise, na Figura 4.20 e na Figura 4.21 estão presentes gráficos para comparação da evolução da área trincada do pavimento e do afundamento da trilha de roda, respectivamente, para o caso de variação de umidade da camada de subleito.

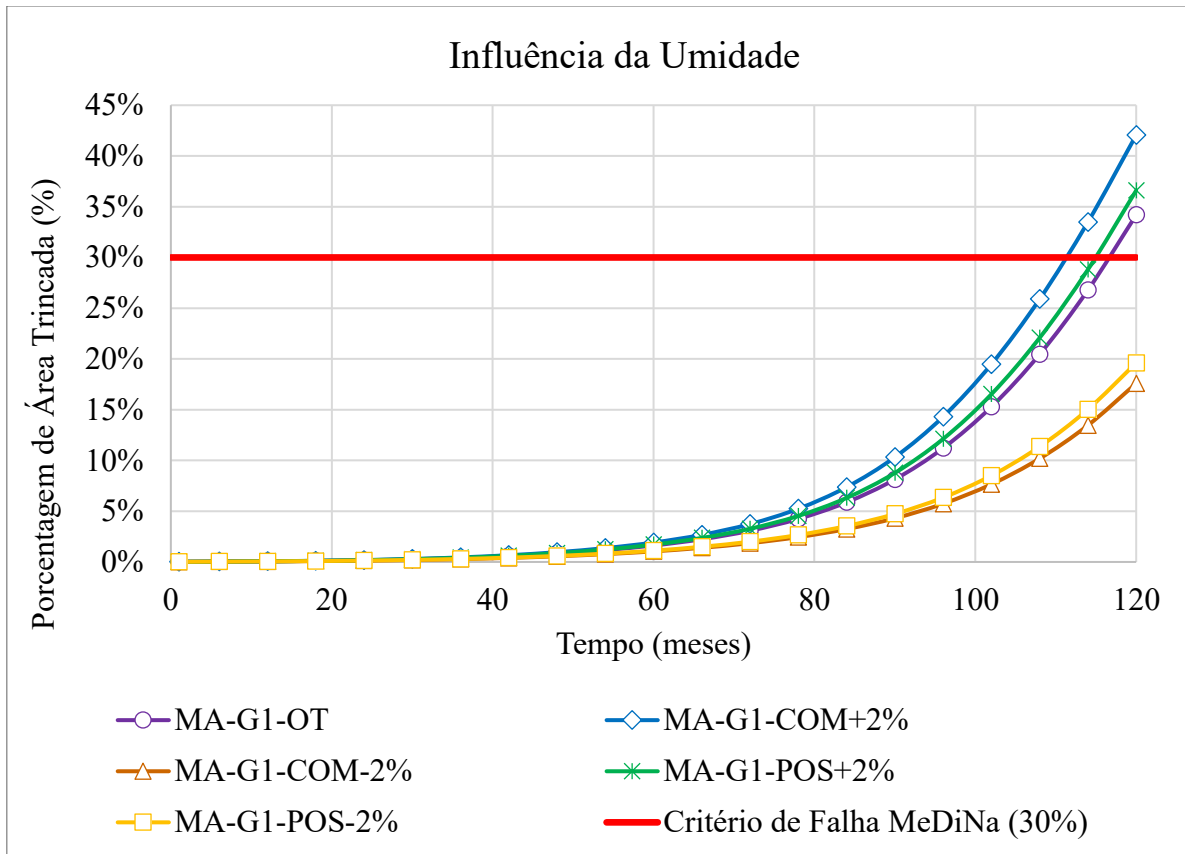


Figura 4.18. Comparação da evolução da área trincada entre os cenários com diferentes umidades da camada de subleito.

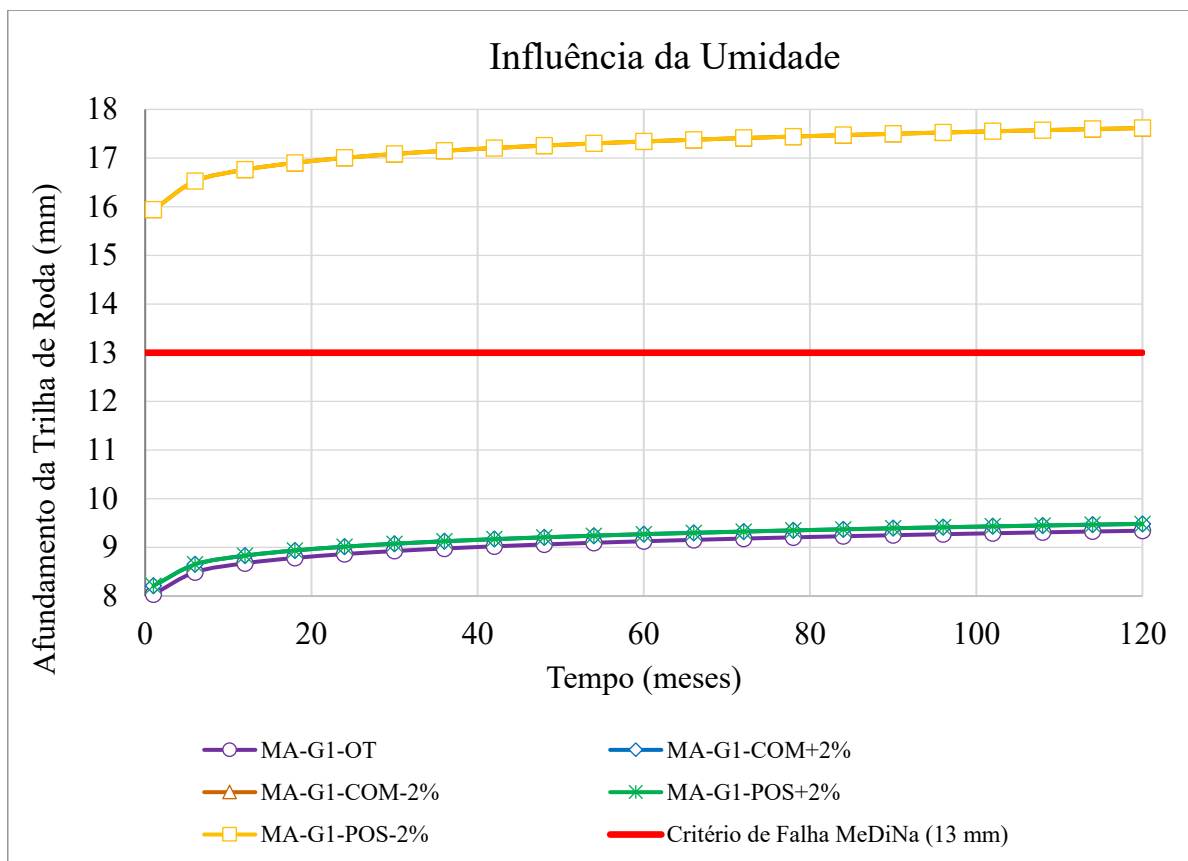


Figura 4.19. Comparação da evolução do afundamento de trilha de roda entre os cenários com diferentes umidades da camada de subleito.

O que primeiro observa-se nesse caso é o fato que o cenário com a camada de subleito com umidade abaixo da ótima, tanto por meio de compactação abaixo da ótima quanto com secagem após compactação apresentam uma evolução muito mais lenta da área trincada. Ambas as estruturas com subleito com umidade ótima-2% conseguiram chegar ao fim da vida útil de 10 anos sem ultrapassar os 30% máximo determinados como ponto de ruptura do MeDiNa.

Isso é importante para comprovar a influência da quantidade de água no solo no módulo de resiliência de solos, demonstrando que a umidade é algo que deve ser muito bem controlado durante a execução da obra. Uma explicação para esse ganho de rigidez e consequente ganho de vida útil do pavimento é a ação da sucção no solo.

Observa-se, também, que comparando com os resultados da estrutura com teor ótimo, as outras estruturas ainda apresentam uma tendência: solos que passaram por processo de secagem e molhagem se distanciam menos do padrão da umidade ótima do que solos que foram compactados com umidade diferentes da ótima. Essa diferença é maior nos solos do ramo

úmido. Essa resposta pode demonstrar que para ganhar ou perda de rigidez, os ciclos de molhagem/secagem pelo clima são menos influentes que uma compactação má executada.

O inverso aconteceu quando se observa a deformação permanente: solos com teor de umidade abaixo do ótimo apresentaram resultados maiores de afundamento de trilha de roda do que solos com umidade ótima e solos com umidade acima da ótima. Isso ocorre, pois solos compactados no ramo seco da curva de compactação tendem a apresentar uma estrutura mais flokulada, com maior presença de vazios e contatos entre partículas menos estáveis sob carregamentos repetidos. Essa condição pode favorecer rearranjos internos do solo quando submetido a milhões de ciclos de carga, contribuindo para a evolução da deformação permanente ao longo do tempo.

5 CONCLUSÃO

Esta dissertação apresentou uma análise mecanístico-empírica do comportamento de pavimentos flexíveis no estado de Roraima a partir de dados experimentais obtidos em um segmento experimental na rodovia BR-432/RR. O estudo realizou uma análise estrutural do pavimento por meio da caracterização dos materiais constituintes, da avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas e da simulação computacional do desempenho da estrutura utilizando o método mecanístico-empírico.

A partir da caracterização laboratorial, constatou-se que a mistura efetivamente executada em campo apresentou um teor de ligante de 5,27%, valor superior aos 4,56% estabelecidos no projeto de dosagem original. Este excesso de ligante impactou diretamente os parâmetros volumétricos, resultando em um volume de vazios inferior ao projetado (3,42%) e um aumento dos vazios no agregado mineral (16,79%), características que podem propiciar o surgimento de exsudação e afundamento de trilha de roda

A caracterização dos agregados minerais demonstrou que os materiais utilizados atendem às especificações técnicas aplicáveis à pavimentação asfáltica, apresentando propriedades físicas adequadas quanto à granulometria, forma dos grãos, resistência ao desgaste e qualidade dos finos. Esses resultados indicam que os agregados possuem potencial para aplicação em misturas asfálticas destinadas a revestimentos rodoviários, contribuindo para o desempenho estrutural da camada de rolamento.

No que se refere ao ligante asfáltico, os ensaios de caracterização indicaram comportamento compatível com a classificação do material utilizado, evidenciando propriedades reológicas adequadas para as condições de temperatura e carregamento consideradas. A análise do comportamento reológico e dos resultados obtidos nos ensaios de MSCR e LAS permitiu avaliar a suscetibilidade do ligante à deformação permanente, indicando desempenho compatível com aplicações em revestimentos sujeitos a tráfego rodoviário.

A avaliação das propriedades volumétricas das misturas asfálticas demonstrou que ambas as misturas estudadas apresentaram parâmetros dentro das faixas recomendadas, todavia, a adequação da mistura ao teor ótimo de projeto demonstrou uma melhoria expressiva na rigidez, apresentando um Módulo de Resiliência (MR) 26,3% superior ao da mistura executada em

campo. A Mistura B também apresentou maior vida de fadiga, confirmando que o excesso de ligante pode comprometer a eficiência do esqueleto mineral da estrutura. Isso tudo demonstra que para garantir que a rodovia tenha um bom desempenho é necessário cuidado não somente na dosagem, mas também na execução da obra.

As análises computacionais realizadas no software MeDiNa evidenciaram três grandes conclusões sobre o dimensionamento do pavimento:

- Efeito da Mistura: A estrutura simulada com a mistura ótima obteve uma vida útil ligeiramente superior à da mistura executada com excesso de ligante.
- Efeito da Geometria: Constatou-se que a simples elevação da espessura das camadas granulares não garante maior durabilidade. A estrutura contendo 4 camadas demonstrou uma vida útil mais que o trilha daquela obtida por cenários que possuíam apenas 3 camadas, provando que a rigidez das camadas subjacentes é primordial para a dissipação adequada das tensões geradas pelo tráfego.
- Efeito da Umidade no Subleito: As simulações demonstraram que a variação da umidade impacta drasticamente o desempenho do pavimento. Solos compactados com umidade abaixo da ótima apresentaram ganhos significativos na vida de fadiga devido ao aumento da rigidez ocasionado pela sucção, mas, em contrapartida, sofreram maiores deformações permanentes (afundamento de trilha de roda) devido à estrutura mais floclada e menos estável sob carregamentos cíclicos.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram a importância da integração entre caracterização laboratorial, análise mecânica e simulação computacional no estudo do desempenho de pavimentos. A utilização de abordagens mecânico-empíricas permite compreender de forma mais consistente os mecanismos de degradação estrutural e fornece subsídios técnicos mais robustos para o dimensionamento e avaliação de pavimentos rodoviários, especialmente em regiões com características geotécnicas e climáticas particulares, como o estado de Roraima.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base nos resultados obtidos e nas limitações inerentes ao escopo desta pesquisa, apresentam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar monitoramento em campo do segmento experimental ao longo do tempo, permitindo comparar os resultados das simulações mecanístico-empíricas com o desempenho real do pavimento sob tráfego e condições ambientais locais;
- Incorporar ensaios adicionais de desempenho, como módulo dinâmico, resistência à tração direta e o *Stress Sweep Rutting*, visando ampliar a base de dados utilizada nas análises mecanístico-empíricas;
- Complementar a classificação PG do ligante: Realizar ensaios com o equipamento BBR (*Bending Beam Rheometer*) no ligante asfáltico da região, a fim de aferir sua temperatura mínima de operação e concluir a classificação completa pelo Grau de Desempenho (PG);
- Desenvolver formas de incorporar o clima das regiões no dimensionamento de pavimentos, usando temperatura, quantidade de chuva, horas de sol e outros fatores que influenciam os materiais das camadas dos pavimentos.

Essas investigações poderão contribuir para o aprimoramento das metodologias de dimensionamento e para o desenvolvimento de soluções mais adequadas às condições regionais, promovendo maior durabilidade e eficiência das infraestruturas rodoviárias do estado de Roraima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2013). Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, EUA, 8p.
- AASHTO (2015). Standard Method of Test for Determining the Asphalt Binder Content of Hot Mix Asphalt (HMA) by the Ignition Method. T 308-10. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, EUA, 10 p.
- AIREY, G., RAHMAN, M. & COLLOP, A. (2003). Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method. *The International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 4, nº 2, p. 105-119.
- ALMEIDA, M.S.S.A., COSTA, W.G.S.C., BRESSANIN, H.W., WARGHA FILHO, N. MELLO, L.G.R. Proposta de Ajuste aa Função Sigmoidal e Área Trincada do MeDiNa Usando Dados da Gerência de Pavimentos e de Segmentos Experimentais. *Revista ENINFRA*. Brasília, DF. 18 p. <https://doi.org/10.70859/2764-9539.v3.n3.135>
- ANP (2022). Resolução nº 897, de 18 de novembro de 2022. Especificações do cimento asfáltico de petróleo, Brasília – DF.
- ARAÚJO, W. F., MONTEIRO NETO, J. L. L., SANDER, C., ALBUQUERQUE, J. A. A., VIANA, T. V. A. & VALERO M. A. M. (2024). Atualização da classificação climática de Boa Vista, Roraima, Brasil. *Pesquisas Agrárias e Ambientais. Nativa*, Sinop, v. 12, n. 2, p. 236-240, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v12i2.16202>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2009). Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Rio de Janeiro, RJ. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2021). Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, RJ. 5 p.
- ASTM (1979). ASTM E 206-72: standard definitions of terms relating to fatigue testing and statistical analysis of fatigue data. USA.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT (2023). Anuário Estatístico TRIIP 2023. ANTT-SUPAS, Brasília, DF, 53 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/passageiros/anuario-estatistico-do-TRIIP/anuario-estatistico-triip-2023.pdf>>. Acesso em 25/01/2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT (2024). Panorama Nacional: Transporte Rodoviário de Cargas. ANTT, Brasília, DF, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/cargas/dadostrc/panorama-nacional-1>>. Acesso em 25/01/2025.
- BALBO, J.T. (2007). Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 560 p.
- BERNUCCI, L.B., MOTTA L.M.G., CERATTI, J.A.P. & SOARES, J.B. (2022). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Petrobras, Abeda, Rio de Janeiro, RJ, 2ª edição, 750 p.
- CAETANO, M.R. (2024). Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Tropicais e Materiais Britados de Pavimentos Rodoviários do Distrito Federal e do Estado de Roraima. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 264 p.
- CARDOSO, J.C.R. (2024). Análise da Influência do Teor de Umidade no Comportamento Mecânico de Solos de Subleito de Pavimento Rodoviário do Distrito Federal e do Estado de Roraima. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 209 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES – CNT (2024). Pesquisa CNT de Rodovias 2024. CNT, Brasília, DF, 2024, 225 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER (1997). DNER-PRO 120/97: Coleta de amostra de agregados. DNER, Rio de Janeiro, RJ, 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2006). Manual de Pavimentação. IPR, Publicação 719, 3. ed., Rio de Janeiro, RJ, 274 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2010a). DNIT 131/2010 – ME: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola. Método de ensaio IPR, Rio de Janeiro, RJ, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2010b). DNIT 155/2010 – ME: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. IPR, Rio de Janeiro, RJ, 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2018a). DNIT 135/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. IPR, Rio de Janeiro, RJ, 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2018b). DNIT 136/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. IPR, Rio de Janeiro, RJ, 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2018c). DNIT 178/2018 – PRO: Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. IPR, Rio de Janeiro, RJ, 19 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2018d). DNIT 180/2018 – ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. IPR, Rio de Janeiro, RJ, 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2018e). DNIT 183/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. IPR, Rio de Janeiro, RJ, 15 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2019). DNIT 415/2019 – ME: Pavimentação – Mistura asfáltica – Teor de vazios de agregados miúdos não compactados – Método de ensaio. IPR, Rio de Janeiro, RJ, 12 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2019). DNIT 184/2018 – ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. IPR, Rio de Janeiro, RJ, 10 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2020a). DNIT 427/2020 – ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio. IPR, Brasília, DF, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2020b). DNIT 424/2020 – ME: Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio. IPR, Brasília, DF, 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2021a). IS-247: Instrução de Serviço – Estudos para elaboração de projetos de implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa. Nota Informativa, DNIT, Brasília, DF, 20 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2021b). DNIT 413/2021 – ME: Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e

- absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. IPR, Brasília, DF, 12 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2021c). DNIT 412/2021 – ME: Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. IPR, Brasília, DF, 10 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2022a). DNIT 438/2022 – PRO: Pavimentação – Misturas asfálticas – Seleção granulométrica de agregados para concreto asfáltico pelo Método Bailey – Procedimento. IPR, Brasília, DF, 19 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2022b). DNIT 428/2022 – ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio. IPR, Brasília, DF.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2023a). Guia para Execução de Segmentos Experimentais – PRO-MeDiNa. IPR, Publicação – 789, Brasília, DF, 2ª Edição, 86p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2023b). Manual de Ajuda – Programa MeDiNa – versão 1.1.9. IPR, Brasília, DF, 39 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2024a). DNIT 031/2024 – ES: Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. IPR, Brasília, DF, 33 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2024b). DNIT 451/2024 – ME: Agregados – Determinação do desgaste por abrasão e impacto no equipamento “Los Angeles” – Método de ensaio. IPR, Brasília, DF, 10 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2024c). DNIT 452/2024 – ME: Agregado graúdo – Adesividade ao ligante asfáltico – Método de ensaio. IPR, Brasília, DF, 6 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2024d). DNIT 450/2024 – ME: Equivalente de areia – Método de ensaio, Brasília, DF, 8 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2024e). DNIT 448/2024 – ME: Pavimentação – Ligante asfáltico – Determinação das propriedades reológicas de ligantes asfálticos usando reômetro de cisalhamento dinâmico - Método de ensaio, Brasília, DF, 22 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2025). DNIT 412/2025 – ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio. IPR, Brasília, DF, 13 p.
- FRANCO, F.A.C.P. (2007). Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 294 p.
- FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença; MOTTA, Laura Maria Goretti da. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecânico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: Manual de Utilização do programa MeDiNa - Apresentação dos programas. Rio de Janeiro - RJ, 2020. 78 p.
- FREDLUND, D. G., VANAPALLI, S. K., XING, A., & PUFAHL, D. E. (1995). Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve.
- FREITAS, J.B, REZENDE, L.R.R., GITIRANA JR., G.F.N. (2020). Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. *Engineering Geology*, v. 270.

- GARBER, N. J. & HOEL, L.A. (2002). Traffic and Highway Engineering. ITP, EUA, 2. ed. 1118 p.
- HUANG, Y.H. (2003). Pavement Analysis and Design. Pearson, New Jersey, 785 p.
- HVEEM, F.N. (1955). Pavement deflection and fatigue failures. HRB, Bulletin 114, EUA, p. 43-87.
- LOPES, L. N. (2022). Fadiga e Deformação Permanente em Ligante e Mistura Asfáltica Modificados Com Borracha Pré-Tratada (RAR). Tese de Doutorado, Publicação 176/2022 Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 222 p.
- MANGIAFICO, S. (2014). Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends. (Doctoral dissertation, Lyon). ENTPE, Lyon.
- MARINHO, F. A. M. (1994). Medição da sucção com o método do papel filtro. 10º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. ABMS, Foz do Iguaçu, PR, p. 515-522.
- MARINHO, F. A. M. (1997). Medição de sucção em solos. In: III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, ÑSAT97, Rio de Janeiro, Anais..., vol. 02, pp. 373-397.
- MEDINA, J. (1997). Mecânica dos Pavimentos. 1ª edição, 380 p. Rio de Janeiro-RJ, Editora UFRJ.
- MEDINA, J & MOTTA, L.M.G. (2015). Mecânica dos Pavimentos. Interciência, Rio de Janeiro, RJ, 3. ed. 640 p.
- MOTTA, L.M.G., (1991) Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- NASCIMENTO, L. A. H.; CHACUR, M.; LEITE, L. F. M. (2008). Uso do compactador giratório na previsão do desempenho de misturas asfálticas. In: Encontro de Asfalto IBP, 19., Anais... Rio de Janeiro, RJ.
- NOGAMI, J. S., & VILLIBOR, D. F. (1995). Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Editora Villibor.
- OLARD, F., Di BENEDETTO, H., DONY, A., & VANISCOTE, J. C. (2005). Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics. Materials and structures, 38(1), 121-126.
- SCHIMIDT, R.J. (1972). A practical method for measuring resilient modulus of asphalt-treated mixes. HRB, n 404, EUA, p. 22-32.
- TURNBULL, W.J., FOSTER, C.R., AHLVIN, R.G. (1962). Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volume. ICSDAP, Michigan, EUA, 1: 821-825.
- VANAPALLI, S. K. (1999). Suction and storage characteristic of unsaturated soils. In Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 2002) (Vol. 3, pp. 1045-1070). Recife, Brasil.