Instituto de Pesquisas em Transportes

Relatório de Pesquisa IPR – 034

RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO SOBRE O COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DOS MATERIAIS EM CONCRETO ASFÁLTICO – 2ª PARTE

BRASÍLIA/DF
OUTUBRO/2026

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
DIRETORIA-GERAL
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA
INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES

Relatório de Pesquisa RP – 034

RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO SOBRE O COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DOS MATERIAIS EM CONCRETO ASFÁLTICO – 2ª PARTE

Elaboração: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Contrato: TED nº 702/2020

Processo: SEI nº 50600.008500/2026-46

DOI: 10.70859/IPR-RP-034/2026

Brasília/DF
Outubro/2026

AUTORIA:

Eng.º Breno Salgado Barra, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.º Gustavo Garcia Otto, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.º João Victor Staub de Melo, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.º Luciana Rohde, Dra. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.º Wellington Longuini Repette, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.º Yader Alfonso Guerrero Pérez, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

REVISÃO:

Eng.º Luiz Heleno Albuquerque Filho – IPR/DPP/DNIT

Eng.º Galileu Silva Santos – IPR/DPP/DNIT

Eng.º Huri Alexandre Raimundo – IPR/DPP/DNIT

EDITORAÇÃO:

Eng.ª Simoneli Fernandes Mendonça – IPR/DPP/DNIT

Eng.ª Victória Barbosa Costa Garcia Vieira – Consórcio Progen/HPT

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria-geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas em Transportes.

Resultados da campanha experimental em laboratório sobre o comportamento viscoelástico dos materiais em concreto asfáltico – 2ª Parte – Brasília/DF, 2026.

68 p. (Relatório de Pesquisa – IPR RP 034)

O conteúdo apresentado neste documento é de inteira responsabilidade dos autores.

A reprodução completa ou parcial desta publicação é permitida, sem alterar seu conteúdo, desde que não tenha fim comercial e que seja citada a referência bibliográfica completa.

APRESENTAÇÃO

A partir do Termo de Execução Descentralizada (TED) nº 702/2020, firmado entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), foi acordado o desenvolvimento do projeto intitulado "Avaliação do Comportamento Viscoelástico Linear de Misturas Asfálticas no Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Submetidos a Carregamento Dinâmico", compreendendo a parceria técnico-executiva entre o Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans), do campus de Florianópolis/SC, o Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), do campus de Joinville/SC, e o Laboratório de Pavimentação (LabPav), do campus de Florianópolis/SC, todos integrados à UFSC.

Neste contexto, a realização dos estudos que perfazem o referido projeto considera, em seu escopo, o desenvolvimento de estudos quanto à influência do comportamento viscoelástico linear de misturas asfálticas no dimensionamento de estruturas de pavimento em regime dinâmico de solicitação, compreendendo as seguintes vertentes: temperatura crítica de dissipação de energia sob a forma de calor; frequência de aplicação do carregamento; habilidade de compactação; resistência à ação da água; deformação permanente; e módulo complexo e fadiga. Tais estudos têm o intuito de colaborar com o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) na elaboração da nova metodologia de dimensionamento de pavimentos de concreto asfáltico para o Brasil.

Para tanto, as atividades previstas no Plano de Trabalho são elencadas a seguir:

- Atividade A – Compra de equipamentos e ações de adaptação dos laboratórios.
- Atividade B – Estudo do comportamento reológico e mecânico em misturas de concreto asfáltico.
- Atividade C – Avaliação de parâmetros influentes na formulação de misturas asfálticas e no dimensionamento de pavimento de concreto asfáltico.
- Atividade D – Aplicação da metodologia proposta nas rotinas numéricas de dimensionamento das estruturas de pavimento.

O andamento para cada uma das quatro atividades será apresentado em Relatórios Gerenciais quadrimestrais e os resultados serão consolidados nos produtos previstos no Plano de Trabalho do TED nº 702/2020. O presente documento corresponde ao Relatório de Pesquisa RP 034 – "Resultados da Campanha Experimental em Laboratório sobre o Comportamento Viscoelástico dos Materiais em Concreto Asfáltico – 2ª Parte".

O conteúdo do RP 034, em sua segunda parte, abrange a complementação dos resultados apresentados na primeira parte, obtidos no escopo da campanha experimental pactuada entre as partes envolvidas na execução do referido TED, compreendendo os parâmetros relacionados aos níveis 3 e 4 da metodologia francesa para a formulação de misturas asfálticas, quais sejam: módulo de rigidez complexo e resistência à fadiga, respectivamente.

Além disso, também serão apresentados os contextos teóricos, de forma breve, bem como os resultados de todos os parâmetros relacionados às misturas asfálticas considerados no dimensionamento de estruturas de pavimento no Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Neste escopo, tem-se a resistência à tração indireta, o módulo de resiliência e fadiga, todos à compressão diametral, bem como o ensaio uniaxial de carga repetida para fins de determinação da deformação permanente, também denominado *Flow Number*.

Cabe destacar que nesta segunda etapa do RP 034, os aspectos vinculados à metodologia MeDiNa serão apresentados de forma sucinta, sem maiores discussões técnicas acerca do tema. Esta condição se justifica por razão dos resultados obtidos neste âmbito serem utilizados apenas como dados de entrada nas simulações numéricas de dimensionamento, usados para fins comparativos com as soluções advindas da metodologia francesa, a qual constitui o cerne técnico-tecnológico desta pesquisa, conforme pactuado no Plano de Trabalho aprovado que originou o TED nº 702/2020.

Logo, o RP 034 foi produzido no contexto de uma ferramenta técnico-consultiva, capaz de contribuir com o corpo técnico do DNIT na tomada de decisões quanto aos critérios a serem adotados para a implantação da nova metodologia de dimensionamento de pavimentos para o Brasil.

RESUMO

O objetivo principal do Relatório de Pesquisa RP 034 é apresentar os resultados da campanha experimental desenvolvida no escopo do protocolo avaliativo previsto na metodologia francesa para a formulação de misturas asfálticas, em complementação àqueles já dispostos na primeira parte. Para tanto, tratar-se-á dos parâmetros relacionados aos níveis fundamentais 3 e 4 da metodologia supracitada para a formulação de misturas asfálticas, quais sejam: módulo de rigidez complexo e resistência à fadiga, respectivamente. Além disso, serão também apresentados os contextos teóricos e resultados de todos os parâmetros relacionados às misturas asfálticas considerados no dimensionamento de estruturas de pavimento no Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), a saber: resistência à tração indireta, módulo de resiliência e fadiga, todos à compressão diametral, bem como o ensaio uniaxial de carga repetida para fins de determinação da deformação permanente, também denominado *Flow Number*. Neste contexto, as análises prosseguem com as formulações previamente desenvolvidas para a pesquisa, utilizando dois tipos de ligantes betuminosos produzidos a partir de modificação em planta industrial da matriz CAP 50/70, denominadas 60/85 E e *Highly Modified Asphalt* (HiMA), com a incorporação de 4,0 % e 7,5 % de diferentes cadeias moleculares do polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), respectivamente, com o intuito de se conceber as misturas asfálticas do tipo *Grave-Bitume* (GB) e *Enrobé à Module Élevé* (EME). É importante destacar que os escopos experimentais e “discussivos” apresentados neste RP 034, constituem e validam os dados de entrada necessários para aplicação direta nas rotinas de cálculo das simulações numéricas para dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico, considerando as premissas das metodologias francesa e MeDiNa, tema a ser abordado no RP 035.

Palavras-chave: formulação; metodologia francesa; metodologia MeDiNa; misturas asfálticas.

ABSTRACT

The main aim of the research report RP 034 is to present the results of the experimental campaign carried out within the scope of the evaluation protocol provided by the French methodology, with regards to formulation of asphalt mixes, in compliment of those already disposed in its first part. Parameters related to the fundamental levels 3 and 4 of the methodology earlier mentioned will be explored, such as: complex stiffness modulus and fatigue resistance. Furthermore, they will be also presented the theoretical contexts, as well as the results of all parameters from the asphalt mixes taken into account by the pavement design methodology so-called MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional): indirect tensile strength; resilient modulus and fatigue, both at diametral compression; and the uniaxial repeated load test for the estimation of the permanent deformation, also called as Flow Number. In this context, the analyses follow the asphalt mix formulations previously developed for the research, comprising two types of bituminous binders produced from industrial modification process of the original matrix CAP 50/70, hereinafter referred as 60/85 E and Highly Modified Asphalt (HiMA), by adding of 4.0 % and 7.5 % of distinct polymeric molecular chains from Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), respectively, aiming to conceive the asphalt mixes so-called *Grave-Bitume* (GB) and *Enrobé à Module Élevé* (EME). It is important to highlight that the experimental and discussion scopes presented in this Product RP 034 – 2nd Part, constitute and validate the input data directly applied into the numerical calculation routine for designing of asphalt concrete pavement structures, considering the conceptive principles of the French and MeDiNa methodologies.

Keywords: formulation; French methodology; MeDiNa methodology; asphalt mixes.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\%\boldsymbol{V}$ – Porcentagem de vazios

μ – Coeficiente de Poisson

μ – Microdeformação (x 10^{-6})

$\Delta\varepsilon_6$ – Intervalo hiperbólico estatístico de ε_6

ε_6 – Deformação para 10^6 ciclos

ΔH – Deslocamento horizontal elástico

ε_p – Deformação plástica

$\sigma_{Rmédia}$ – Resistência à tração média

εt – Deformação específica resiliente de tração

σ_R – Resistência à tração, em Mpa

AASHTO – *American Association of State Highway Officials*

Abs. – Absorção

AFNOR – *Association Française de Normalisation*

b – Expoente da equação de fadiga

cm – Centímetros

CP – Corpo de prova

D – Diâmetro do corpo de prova

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

E^* – Módulo de rigidez complexo

$|E^*|$ – Norma do módulo de rigidez complexo

$E1$ – Componente elástica do módulo de rigidez complexo

$E2$ – Componente viscosa do módulo de rigidez complexo

EME – *Enrobé à Module Élevé*

EN – *European Norm*

ES – Especificação de serviço

F – Carga aplicada, em N

FFM – Fator de Fadiga da Mistura

FN – *Flow Number*

GB – Grave-Bitume

GDPPav – Grupo de Desenvolvimento e Pesquisa em Pavimentação

Gmb – Densidade aparente de projeto

H, t – Altura do corpo de prova

HiMA – *Highly Modified Asphalt*

Hz – Hertz

IPR – Instituto de Pesquisa em Transporte

$k1, k2$ – Parâmetros experimentais do modelo da curva de fadiga

km/h – Quilômetros por hora

kPa – Kilopascal

LabPav – Laboratório de Pavimentação da UFSC Campus Florianópolis

LDTPav – Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação

LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*

ME – Método de ensaio

MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional

mm – Milímetros

mm/s – Milímetros por segundo

MPa – Megapascal

MR – Módulo de resiliência, em MPa

$MRmédio$ – Módulo de resiliência médio

$Msss$ – Massa submersa superfície seca

$Mssssub$ – Massa submersa

N – Quantidade de solicitações dentro um determinado período

N_{100}; N_{250} – Número de ciclos correspondentes ao nível de 100 e 250 microdeformações

NF – *Norme Française*

°C – Graus Celsius

P – Carga cíclica

PCG – Prensa de compactação giratória

Ps – Peso seco

$R2$ – Coeficiente de determinação

RTI – Resistência à tração indireta

s – Segundos

SBS – Estireno-Butadieno-Estireno

SN – Desvio-padrão dos resíduos

TED – Termo de Execução Descentralizada

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

φ – Ângulo de fase

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curvas isócronas 16
Figura 2.2 – Curvas isotérmicas 16
Figura 2.3 – Plano Cole-Cole 17
Figura 2.4 – Espaço de Black 18
Figura 2.5 – Curva de equivalência frequência-temperatura 19
Figura 3.1 – Curva de fadiga da mistura asfáltica GB a 10 ºC e 25 Hz 21
Figura 3.2 – Curva de fadiga da mistura betuminosa GB a 20 ºC e 25 Hz 22
Figura 3.3 – Curva de fadiga da mistura betuminosa GB a 25 ºC e 25 Hz 22
Figura 3.4 – Curva de fadiga da mistura betuminosa EME a 10 ºC e 25 Hz 23
Figura 3.5 – Curva de fadiga da mistura betuminosa EME a 15 ºC e 25 Hz 23
Figura 3.6 – Curva de fadiga da mistura betuminosa EME a 20 ºC e 25 Hz 24
Figura 4.1 – Fluxograma de execução dos ensaios da metodologia MeDiNa 28
Figura 4.2 – PCG do LabPav/UFSC (Florianópolis/SC) 30
Figura 4.3 – Equipamento MA-250 30
Figura 4.4 – Ensaio de tração indireta à compressão diametral 31
Figura 4.5 – Ensaio de módulo resiliente à compressão diametral 33
Figura 4.6 – Ensaio de fadiga à compressão diametral 34
Figura 4.7– Curva de fadiga à compressão diametral da mistura asfáltica GB 35
Figura 4.8 – Curva de fadiga à compressão diametral da mistura asfáltica EME 36
Figura 4.9 – Classes de desempenho das misturas asfálticas correlacionando MR x FFM 37
Figura 4.10 – Ensaio uniaxial de carga repetida 38
Figura 4.11 – Zonas de avaliação da evolução da deformação permanente para determinação do Flow Number 39
Figura 4.12 – Corpo de prova (a) antes do ensaio e (b) depois de atingir a zona terciária na curva de deformação plástica 39
Figura 4.13 – Flow Number da mistura asfáltica GB (CP 1) 41
Figura 4.14 – Flow Number da mistura asfáltica GB (CP 2) 42
Figura 4.15 – Flow Number da mistura asfáltica GB (CP 3) 42
Figura 4.16 – Flow Number da mistura asfáltica GB (CP 4) 43

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Indicadores característicos do comportamento à fadiga das misturas asfálticas GB e EME 21

Tabela 4.1 – Quantitativo mínimo previsto de amostras por tipo de mistura asfáltica considerando a metodologia MeDiNa 29

Tabela 4.2 – Relação entre o $\boldsymbol{FN}$ e as condições de tráfego em campo ($\boldsymbol{N}$) pela metodologia MeDiNa 40

Tabela 4.3 – Compilação dos resultados do $\boldsymbol{FN}$ da mistura asfáltica GB 41

Tabela 4.4 – Compilação dos resultados obtidos no âmbito da metodologia MeDiNa 44

Tabela AP A1 – Resultados da análise reológica da mistura asfáltica GB (continua) 47

Tabela AP A1 – Resultados da análise reológica da mistura asfáltica GB (conclusão) 48

Tabela AP A2 – Resultados da análise reológica da mistura asfáltica EME (continua) 48

Tabela AP A2 – Resultados da análise reológica da mistura asfáltica EME (conclusão) 49

Tabela AP B1 – Resultados da mistura asfáltica GB a 10 ºC e 25 Hz 50

Tabela AP B2 – Resultados da mistura asfáltica GB a 20 ºC e 25 Hz 51

Tabela AP B3 – Resultados da mistura asfáltica GB a 25 ºC e 25 Hz 52

Tabela AP B4 – Resultados da mistura asfáltica EME a 10 ºC e 25 Hz 53

Tabela AP B5 – Resultados da mistura asfáltica EME a 15 ºC e 25 Hz 54

Tabela AP B6 – Resultados da mistura asfáltica EME a 20 ºC e 25 Hz 55

Tabela AP C1 – Resultados da mistura asfáltica GB (continua) 56

Tabela AP C1 – Resultados da mistura asfáltica GB (conclusão) 57

Tabela AP C2 – Resultados da mistura asfáltica EME (continua) 58

Tabela AP C2 – Resultados da mistura asfáltica EME (conclusão) 59

Tabela AP D1 – Resultados da mistura asfáltica GB 60

Tabela AP D2 – Resultados da mistura asfáltica EME 61

Tabela AP E1 – Resultados da mistura asfáltica GB 62

Tabela AP E2 – Resultados da mistura asfáltica EME 63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12
2. MÓDULO COMPLEXO 15
2.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES 15
3. FADIGA 20
3.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES 20
4. METODOLOGIA MEDINA 28
4.1 METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÕES 31
4.1.1 TRAÇÃO INDIRETA À COMPRESSÃO DIAMETRAL 31
4.1.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL 32
4.1.3 FADIGA À COMPRESSÃO DIAMETRAL 34
4.1.4 ENSAIO UNIAXIAL DE CARGA REPETIDA – *FLOW NUMBER* 37
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 45
APÊNDICE 47
APÊNDICE A – MÓDULO COMPLEXO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS GB E EME 47
APÊNDICE B – FADIGA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS GB E EME 50
APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS GB E EME 56
APÊNDICE D – MÓDULO DE RESILIÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS GB E EME 60
APÊNDICE E – FADIGA À COMPRESSÃO DIAMETRAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS GB E EME 62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64

1. INTRODUÇÃO

Compreender as propriedades reológicas e mecânicas das misturas asfálticas a diferentes temperaturas e frequências de solicitação é essencial, devido à influência que exercem diretamente sobre o comportamento viscoelástico linear destes materiais (Chen *et al*., 2023; Mikowski *et al*., 2021).

O módulo de rigidez, seja ele oriundo do plano complexo ou não, é uma das propriedades mais comumente utilizadas para o desenvolvimento de análises e modelizações das estruturas de pavimento (Owais, 2024; Sasidaran *et al*., 2023).

Os principais elementos do módulo complexo (E^*) são o vetor escalar resultante denominado "norma $|E^*|$", o ângulo de fase (φ) e as componentes elástica (E_1) e viscosa (E_2), que descrevem a variação do comportamento viscoelástico linear das misturas asfálticas a uma dada condição combinada de temperatura e frequência de solicitação (Coulon *et al*., 2021; Nemati; Dave, 2018; Sayegh, 1965; Huet, 1963), conforme descrito em detalhes na subseção 3.1 do RP 031 – Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês.

No caso do módulo resiliente, obtido à compressão diametral, estas variáveis representam o nível de tensão e a respectiva deformação recuperável obtida a partir dos pulsos de força e deslocamentos senoidais. Em laboratório, a determinação do módulo de rigidez pode ser realizada utilizando diversos procedimentos normativos, destacando-se a AASHTO T-342 (2022), AFNOR NF EN 12697-26 (2018) e DNIT 135/2018 – ME.

Quanto à fadiga, é o principal fenômeno que conduz os pavimentos, sobretudo as camadas betuminosas, ao colapso, daí a importância de compreendê-lo adequadamente. Em conjunto com o módulo de rigidez, constituem os parâmetros denominados fundamentais para o dimensionamento de estruturas de pavimento de concreto asfáltico (Zhao *et al*., 2023; Petit *et al*., 2012).

No campo, as misturas asfálticas são submetidas a solicitações de curta duração em cada passagem de carregamento, a partir de esforços de flexão alternada no sentido longitudinal da solicitação (vide seção 1 do RP 031, bem como as seções 2.1 e 2.2 do RP 032 – Diretrizes para Aplicação do Método Francês para Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Asfáltico).

As tensões de tração, então, surgem na parte inferior das camadas betuminosas e se repetem ciclicamente. Entretanto, não provocam imediatamente a ruptura do material, mas a sua repetição pode levar, em longo prazo, ao colapso estrutural por fadiga (Zeng *et al*., 2023; Sol-Sánchez *et al*., 2018).

Desta forma, entre os critérios utilizados para dimensionar as estruturas dos pavimentos, é indispensável considerar as características dos materiais quanto ao número de repetições de carregamento que suportam quando solicitados aos esforços mecânicos e em condições ambientais variadas, intrínsecos ao fenômeno da fadiga (Boussabnia *et al*., 2023; Xiao *et al*., 2022; Arabzadeh; Guler, 2019).

Porém, isto deve ser feito a partir da execução de ensaios laboratoriais que sejam capazes de simular as condições de solicitação observadas no campo e que tenham uma série extensa de estudos comparativos entre as duas situações, a fim de que se obtenha uma relação campo-laboratório mais próxima possível da sua interpretação (Lv *et al*., 2022; Maljaars; Vrouwenvelder, 2014; Manuel LPC, 2007).

Por estas razões, tem-se que no contexto da mecânica dos pavimentos, com foco nas misturas asfálticas, a análise adequada das soluções de dimensionamento não pode ser realizada dissociando-se o módulo de rigidez da resistência à fadiga. Logo, devem ser observadas ambas as condições em conjunto (Hu *et al*., 2024; Noura *et al*., 2023).

Isto se deve ao fato da fadiga ser um fenômeno que se caracteriza pela dissipação gradual de energia das misturas asfálticas quando submetidas a um regime de carregamento cíclico, situação que, consequentemente, induz a um aumento das amplitudes de deslocamento resultantes com o tempo. Logo, implicando no decréscimo do módulo de rigidez das camadas betuminosas (Rys; Szydlowski, 2024; Zhang; Oeser, 2021; Boudabouss *et al*., 2013).

Dado o exposto, a motivação principal deste RP 034, consiste em complementar a apresentação dos resultados da primeira etapa da campanha experimental pactuada no âmbito do TED nº 702/2020, agora com foco nos níveis fundamentais 3 e 4 da metodologia francesa para formulação de misturas asfálticas, correspondentes aos ensaios de módulo de rigidez complexo e resistência à fadiga, respectivamente.

Ainda, será abordado o contexto teórico da metodologia MeDiNa, de forma breve, no que diz respeito à descrição dos ensaios de resistência à tração indireta, módulo resiliente e fadiga, todos à compressão diametral e uniaxial de carga repetida para a determinação da deformação permanente, também conhecido como *Flow Number*. Em ato contínuo, a apresentação dos resultados correspondentes será procedida.

Intenta-se, com a elaboração do RP 034, compor o banco de dados correspondente aos dados fundamentais de entrada nas rotinas das simulações numéricas, utilizadas para o dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico, considerando os princípios conceptivos das metodologias francesa e MeDiNa, situação que permitirá a propiciação de cenários comparativos das soluções obtidas, assunto que será objeto do RP 035 – Simulação do Comportamento Mecânico das Estruturas de Pavimento sob Solicitação Dinâmica.

Os resultados apresentados consideram as formulações de misturas asfálticas já concebidas previamente para esta pesquisa, denominadas *Grave-Bitume* (GB) e *Enrobé à Module Élevé* (EME), destinadas à composição de camadas estruturais em pavimentos de concreto asfáltico (vide subseção 2.3 do RP 033).

Conforme vem sendo a tônica dos produtos apresentados no Termo de Execução Descentralizada (TED) nº 702/2020, reitera-se que a abordagem discorrida nas seções seguintes não visa relacionar a metodologia francesa a outras existentes, tampouco esgota a gama de contextos e de aplicabilidades que a concerne. Ao invés disso, espera-se contribuir com o balizamento do novo método de dimensionamento dos pavimentos de concreto asfáltico para o Brasil, ora em desenvolvimento.

Para tanto, este terceiro produto, em sua segunda parte, previsto no Plano de Trabalho do TED nº 702/2020, propõe tratar sobre os resultados complementares da campanha experimental realizada, tendo sido organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: introduz o tema ao leitor, deixando-o ao par das considerações gerais do estudo.
- Capítulo 2: trata dos resultados relacionados ao nível 3 da metodologia francesa para formulação de misturas asfálticas, correspondente ao módulo de rigidez complexo, de forma comparativa entre as formulações desenvolvidas.
- Capítulo 3: discorre sobre os resultados do nível 4 da metodologia francesa para a formulação de misturas asfálticas, obtidos nos ensaios de fadiga e considerando, também, uma análise comparativa entre as formulações desenvolvidas.
- Capítulo 4: trata do contexto teórico dos ensaios que compõem o arcabouço da metodologia MeDiNa para o estudo das misturas asfálticas, seguido da apresentação dos resultados obtidos.
- Capítulo 5: apresenta as conclusões acerca das análises efetuadas e da viabilidade técnica das formulações estudadas, para fins de dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico.

Por fim, são informadas as referências utilizadas para a elaboração do presente documento.

2. MÓDULO COMPLEXO

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, de forma comparativa, quanto ao módulo de rigidez complexo (E^*) das misturas asfálticas *Grave-Bitume* (GB) e *Enrobé à Module Élevé* (EME).

As temperaturas utilizadas durante os testes foram de -10 ºC, 0 ºC, 10 ºC, 15 ºC, 20 ºC, 25 ºC, 30 ºC, 40 ºC, 50 ºC e 60 ºC, com frequências aplicadas de 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz, 25 Hz e 30 Hz. A amplitude da deformação utilizada foi de 40 x 10^{-6} μdef, obedecendo todos os protocolos normativos (AFNOR NF EN 12697-26, 2018) descritos na subseção 3.4 do RP 031 – Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês.

É importante esclarecer que as colorações identificadoras nas legendas das Figuras 2.1 a 2.5, ilustradas na subseção 2.1, são as mesmas para as misturas asfálticas GB e EME, em que a distinção se dá pelas linhas tracejadas e contínuas, correspondentes à primeira e à segunda, respectivamente.

2.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo reológico das misturas asfálticas GB e EME permitiu obter as tabulações de dados (Apêndice A; Tabelas AP A1 e AP A2) e as representações gráficas no plano complexo, a saber: curva isócrona, curva isotérmica, plano Cole-Cole, espaço de Black e curva de equivalência frequência-temperatura, também denominada de curva mestre, as quais serão analisadas nos parágrafos subsequentes.

Os resultados obtidos demonstram que a mistura asfáltica EME é notoriamente menos suscetível térmica e cineticamente do que a GB até a temperatura de 15 ºC, apresentando maiores valores referentes à norma do módulo complexo $|E^*|$ para as mesmas temperaturas e frequências de testes nas curvas isócronas (Figura 2.1) e isotérmicas (Figura 2.2).

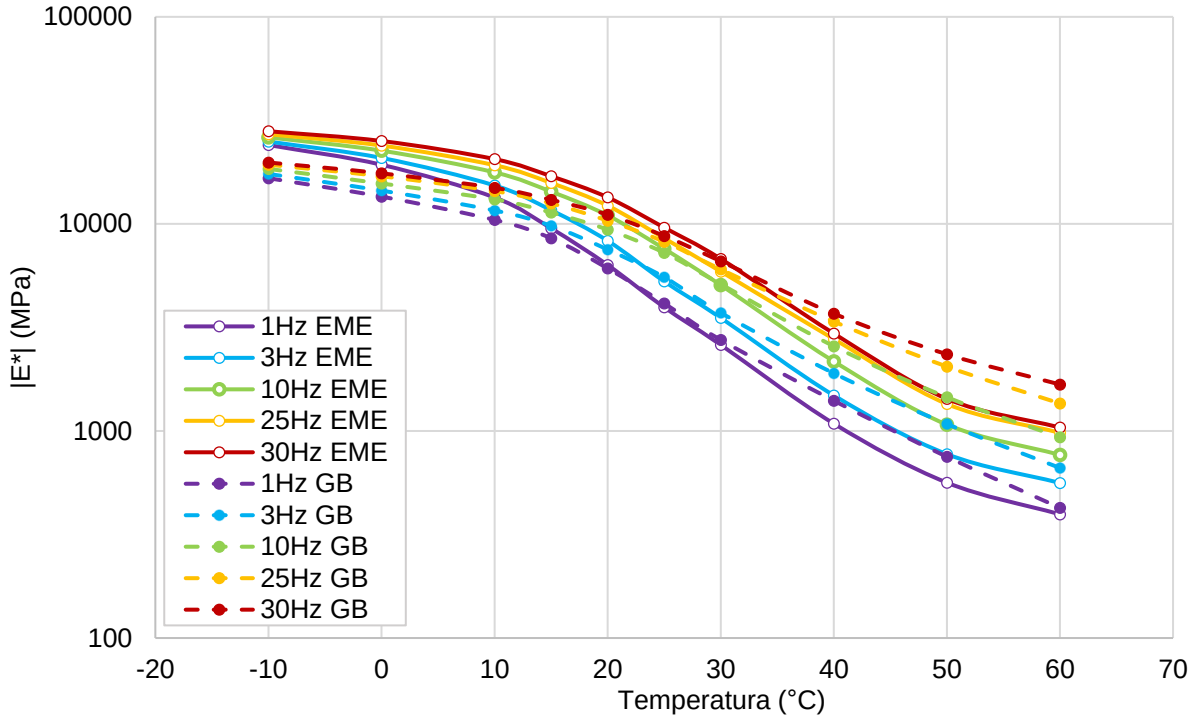


Figura 2.1 – Curvas isócronas

Fonte: LDTPav (2025a)

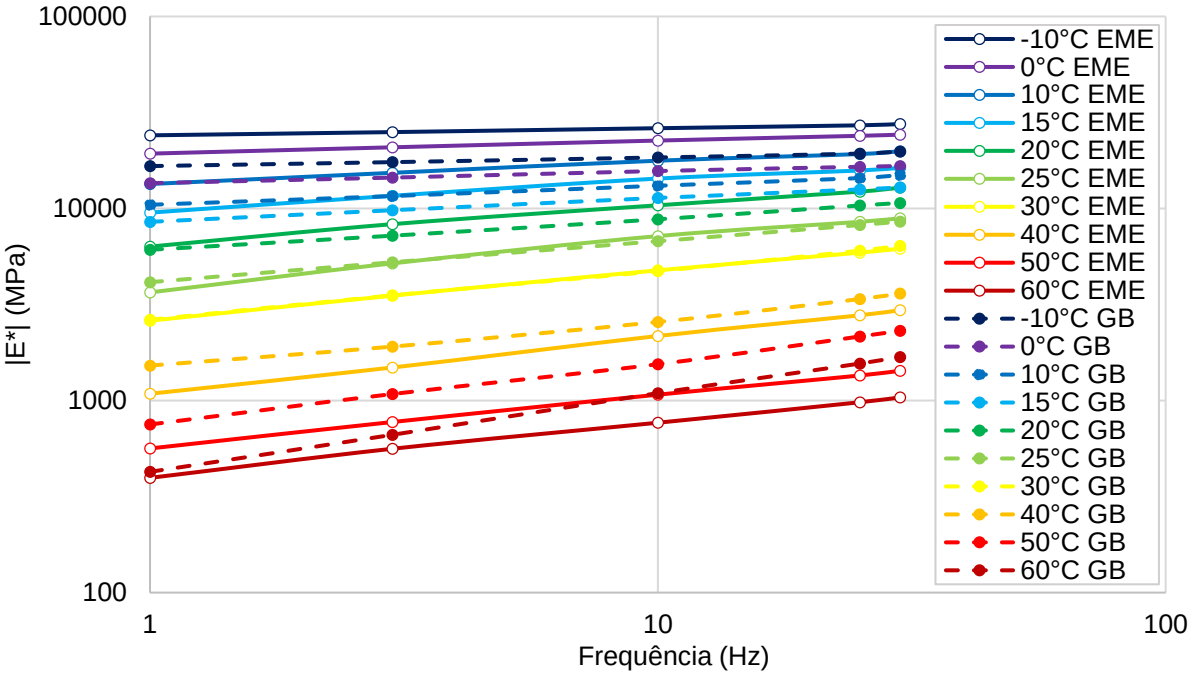


Figura 2.2 – Curvas isotérmicas

Fonte: LDTPav (2025a)

Entretanto, entre 20 ºC e 25 ºC, percebe-se uma aproximação entre os valores da $|E^*|$ de ambas as formulações, devido a um decréscimo mais acentuado da componente elástica (E_1), sobretudo da EME, aliado a uma tendência convergente da componente viscosa (E_2) com a GB, permitindo inferir que se trata de uma região com forte dissipação de energia sob a forma de calor das misturas asfálticas.

Em contrapartida, a partir de 30 ºC, é possível verificar que a GB apresenta maiores valores da $|E^*|$ que a EME, independente da frequência de teste. Neste contexto, em que pese a GB dispor de valores de E_1 muito próximos aos da EME, indica maiores escalas de E_2. Logo, tem-se que nas condições em que as maiores temperaturas atuam, o fenômeno da fluência relacionado à ativação da componente viscosa se torna mais intenso na GB do que na EME.

Estas constatações ratificam o contexto da cadeia polimérica SBS D0243 possuir maior efetividade elástica do que a 1101 AT, o que também garante à EME maior recuperação elástica às solicitações impostas, corroborando as discussões apresentadas nas seções 2.2.1 e 2.2.2 do RP 033.

Este cenário se confirma na análise do plano Cole-Cole (Figura 2.3), em que é possível observar uma tendência contínua de maior amplitude dos valores de E_1 para a EME, correspondentes à conservação de energia das misturas asfálticas no plano complexo.

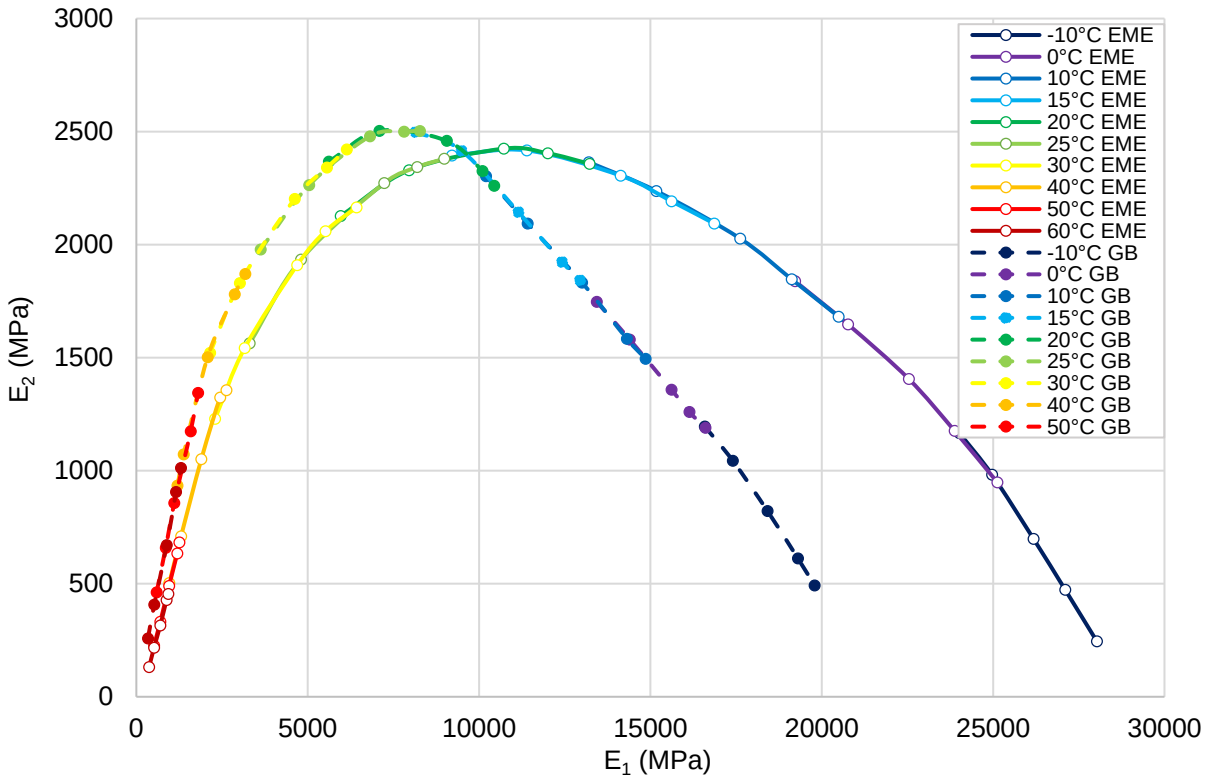


Figura 2.3 – Plano Cole-Cole

Fonte: LDTPav (2025a)

No que tange às temperaturas consideradas mais críticas quanto à dissipação de energia no plano complexo, tem-se, ao observar atentamente a evolução reológica no plano Cole-Cole (Figura 2.3), situações mais latentes neste quesito, a saber: 15 ºC e 20 ºC para a EME e 20 ºC e 25 ºC para GB. A indicação destas temperaturas está relacionada à presença na região que perfaz a trajetória dos picos parabólicos do referido plano complexo, condição de maior participação da componente E_2, também denominada de “módulo de perda”.

Por esta razão, as temperaturas supracitadas foram selecionadas para a realização dos testes de fadiga, a serem abordados no Capítulo 3, além da temperatura de 10 ºC prevista no protocolo normativo da metodologia francesa.

Em consonância às tendências já discorridas, o espaço de Black (Figura 2.4) indica menores retardos na resposta às solicitações para a EME, apresentando ângulos de fase δ mais reduzidos para uma mesma escala da $|E^*|$, ratificando a maior contribuição da componente elástica no comportamento reológico da matriz betuminosa HiMA que constitui a EME, em relação à 60/85 E da GB, corroborando os indicadores do plano Cole-Cole.

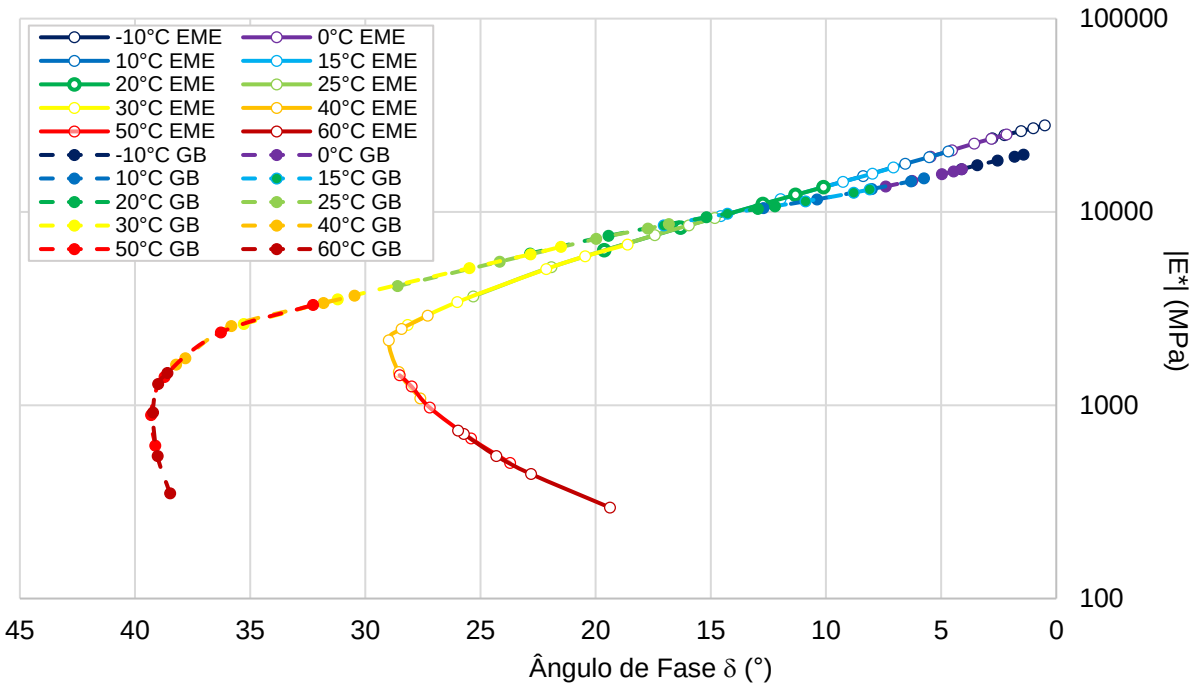


Figura 2.4 – Espaço de Black

Fonte: LDTPav (2025a)

Ainda, em uma avaliação global do espectro reológico no domínio frequencial de solicitação, verifica-se que nas condições mais críticas de imposição de carregamento sobre um material viscoelástico, isto é, elevada temperatura e a um regime quase estático de aplicação dos esforços, os valores da $|E^*|$ são mais favoráveis à EME, de acordo com as curvas de equivalência frequência-temperatura (Figura 2.5).

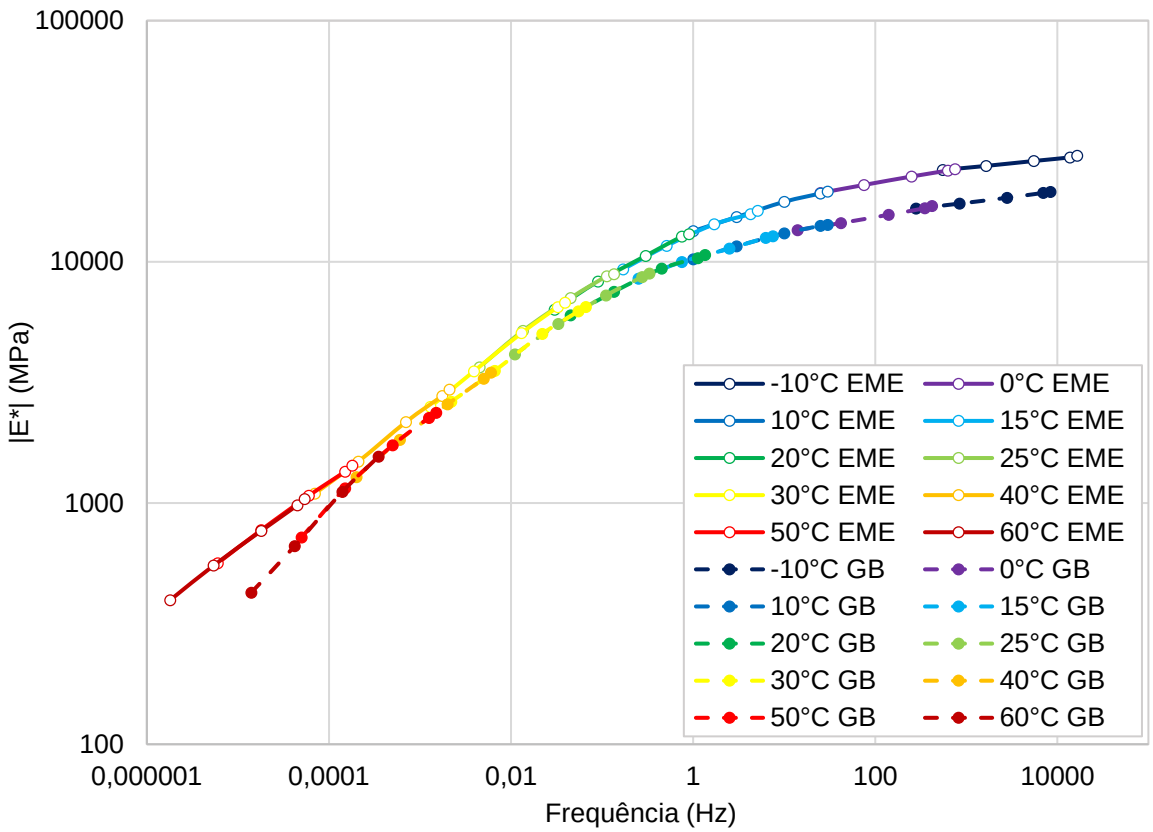


Figura 2.5 – Curva de equivalência frequência-temperatura

Fonte: LDTPav (2025a)

Além disso, a trajetória contínua das referidas curvas comprova que as misturas asfálticas formuladas corroboram os resultados dos testes de reometria por cisalhamento dinâmico apresentados no RP 033, atendendo à prerrogativa da linearidade no comportamento viscoelástico, estando em concordância com o princípio de superposição de Boltzmann. Logo, apresentam proporcionalidade entre as amplitudes de tensão aplicadas e deformação resultantes, no âmbito das microdeformações.

Por fim, os valores alcançados para a $|E^*|$ das misturas GB e EME, a 15 ºC e 10 Hz, foram 11348 MPa e 14316 MPa (Apêndice A; Tabelas AP A1 e AP A2), respectivamente. Logo, atendem aos requisitos mínimos exigidos para o enquadramento nas classes GB4 (≥ 11.000 MPa) e EME2 (≥ 14.000 MPa), conforme previsto no MANUEL LPC (2007), constituindo as misturas asfálticas mais nobres de suas categorias na metodologia francesa.

3. FADIGA

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, de forma comparativa, quanto à resistência à fadiga das misturas asfálticas *Grave-Bitume* (GB) e *Enrobé à Module Élevé* (EME).

As temperaturas utilizadas durante os testes foram selecionadas conforme o critério discorrido na subseção 2.1 (15 ºC e 20 ºC para a EME e 20 ºC e 25 ºC para a GB), além da condição padrão estabelecida na metodologia francesa de 10 ºC, seguindo todos os protocolos de execução (AFNOR NF EN 12697-24, 2020) apresentados na subseção 3.5 do RP 031.

Quanto à frequência de solicitação, considerando o escopo do Termo de Execução Descentralizada (TED) nº 702/2020, que aborda em seu cerne científico a verificação do efeito da variação da temperatura no comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, foi adotada a parametrização fixa de 25 Hz, por estar especificada normativamente na metodologia francesa. Além disso, apesar de ser uma possibilidade factível, não haveria tempo hábil para a realização da campanha experimental compreendendo variações de temperatura e frequência no prazo estipulado para o encerramento da pesquisa.

As curvas de fadiga foram determinadas experimentalmente a partir de três níveis de deformação com, no mínimo, seis corpos de prova em cada um. Assim, dada a gama de temperaturas testadas e das características distintas e intrínsecas das misturas asfálticas GB e EME, a escala dos respectivos níveis de deformação são variáveis, conforme será verificado a seguir. Isto se dá para que seja respeitada a preconização normativa de que dois níveis compreendam ciclos de solicitação que conduzam os corpos de prova à ruptura, situados majoritariamente no intervalo entre 10^4 e 10^6 ciclos e um acima de 10^6 ciclos.

3.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos resultados determinados experimentalmente, foi possível obter a tabulação dos dados (Apêndice B; Tabelas AP B1 a AP B6), bem como estabelecer os principais indicadores característicos das misturas asfálticas, para fins de dimensionamento das estruturas de pavimento, tais como: deformação para 106 ciclos ($\varepsilon 6$), expoente da equação de fadiga (b) e desvio-padrão dos resíduos (SN). Cabe destacar, também, o intervalo hiperbólico estatístico da $\varepsilon 6$ ($\Delta\varepsilon 6$), que será discutido em detalhes adiante (Tabela 3.1 e Figuras 3.1 a 3.6).

Tabela 3.1 – Indicadores característicos do comportamento à fadiga das misturas asfálticas GB e EME

Mistura asfáltica	Teor de ligante (%)	Condição de teste	ε_6 (x 10^{-6}) μdef	$\Delta\varepsilon_6$ (x 10^{-6}) μdef	b	SN
GB	4,54	10 ºC e 25 Hz	117,37	6,39	-7,3220	0,4326
		20 ºC e 25 Hz	124,57	9,77	-5,9776	0,4983
		25 ºC e 25 Hz	138,74	8,18	-6,9357	0,4254
EME	5,50	10 ºC e 25 Hz	137,95	5,24	-6,8322	0,2391
		15 ºC e 25 Hz	153,74	10,10	-4,5800	0,2921
		20 ºC e 25 Hz	185,06	6,42	-7,4625	0,2514

Fonte: LDTPav (2025a)

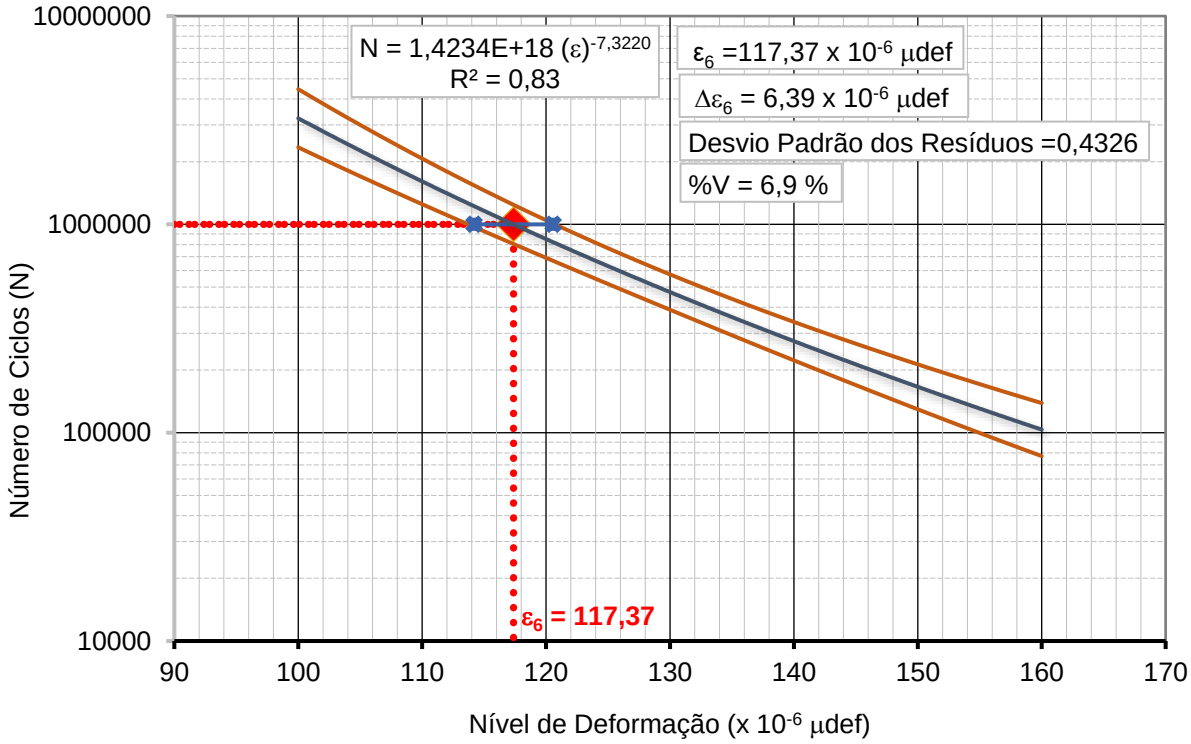


Figura 3.1 – Curva de fadiga da mistura asfáltica GB a 10 ºC e 25 Hz

Fonte: LDTPav (2025a)

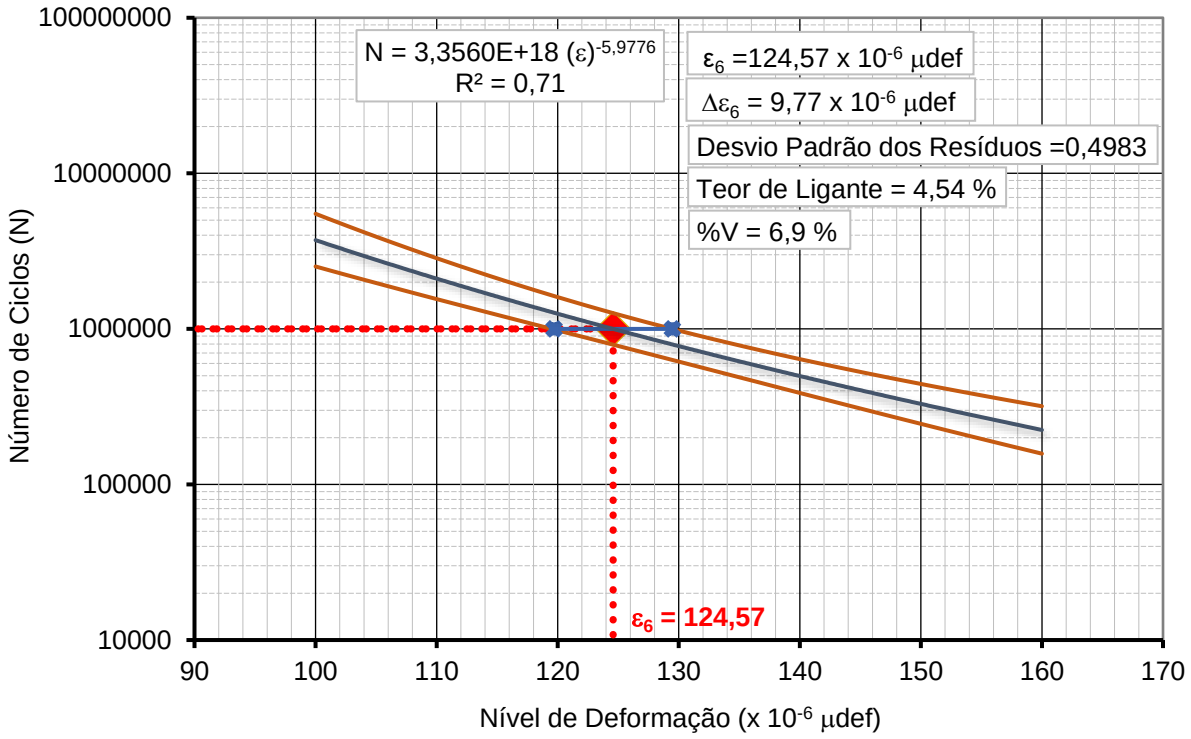


Figura 3.2 – Curva de fadiga da mistura betuminosa GB a 20 ºC e 25 Hz

Fonte: LDTPav (2025a)

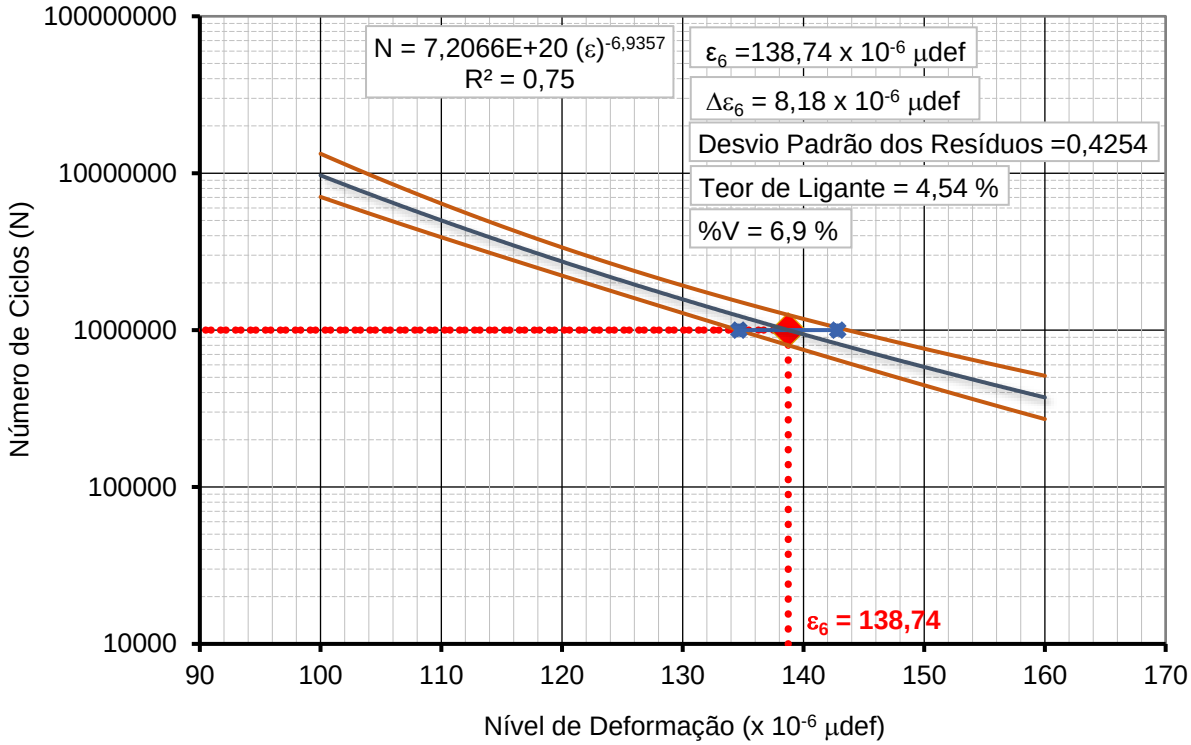


Figura 3.3 – Curva de fadiga da mistura betuminosa GB a 25 ºC e 25 Hz

Fonte: LDTPav (2025a)

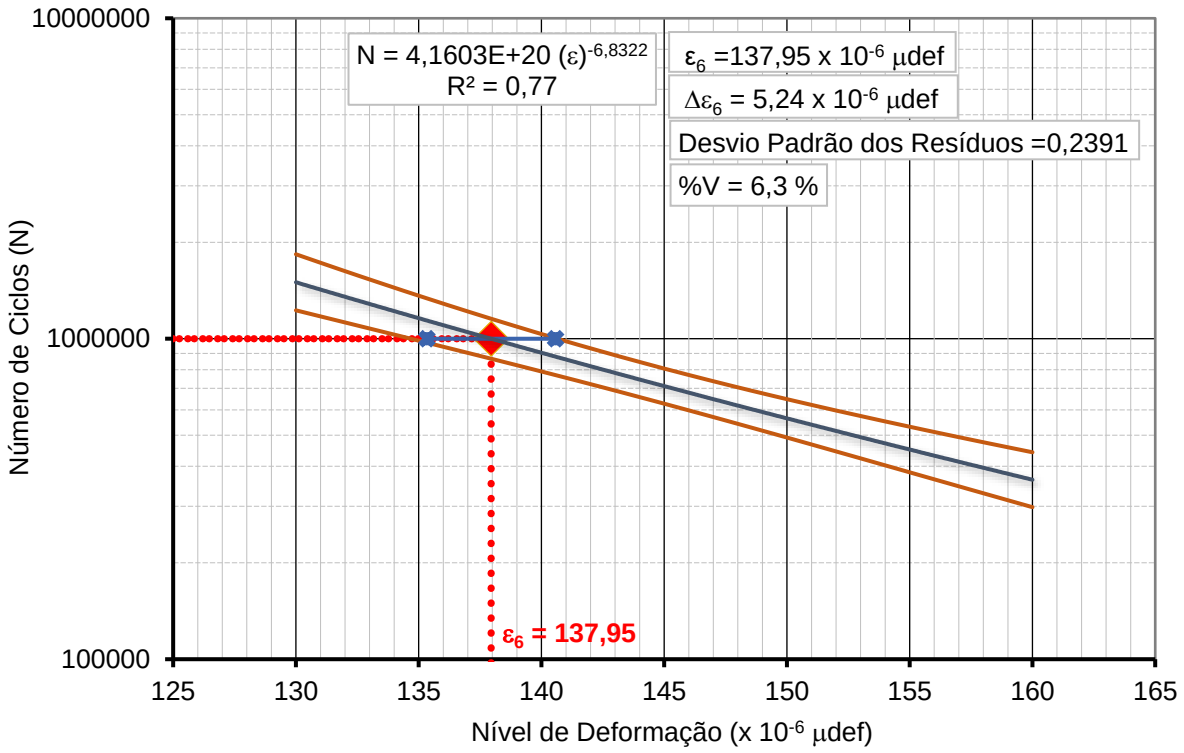


Figura 3.4 – Curva de fadiga da mistura betuminosa EME a 10 ºC e 25 Hz

Fonte: LDTPav (2025a)

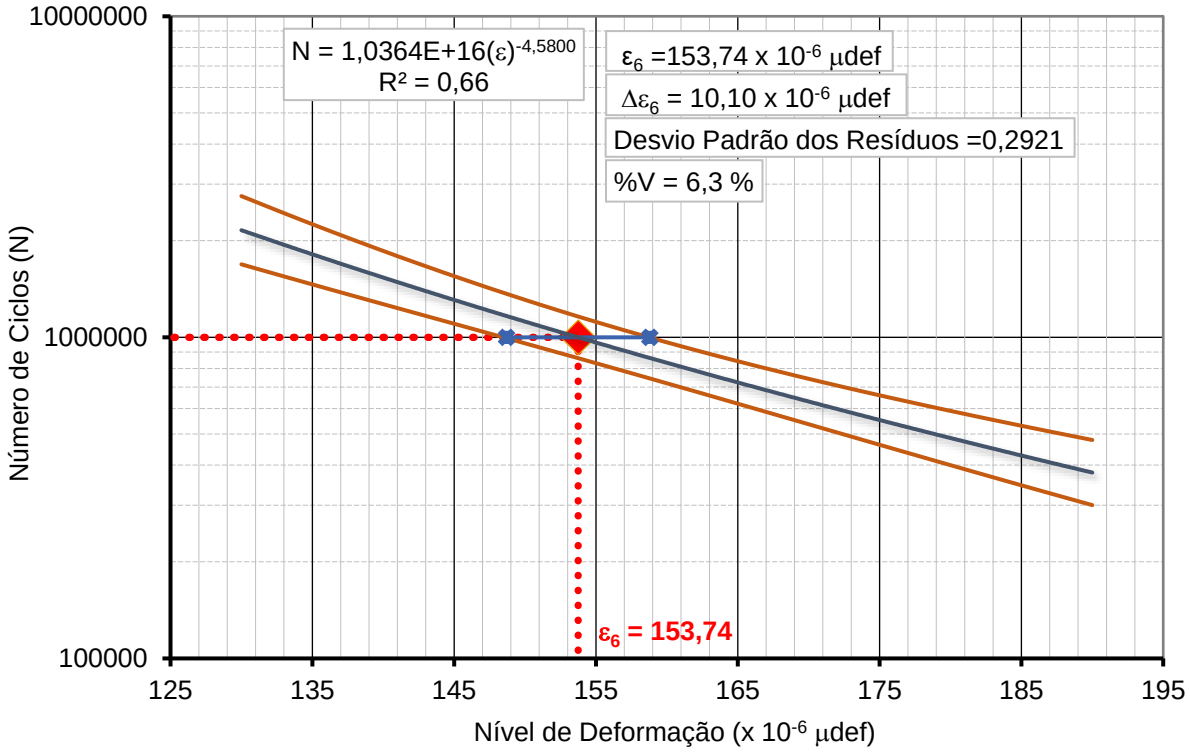


Figura 3.5 – Curva de fadiga da mistura betuminosa EME a 15 ºC e 25 Hz

Fonte: LDTPav (2025a)

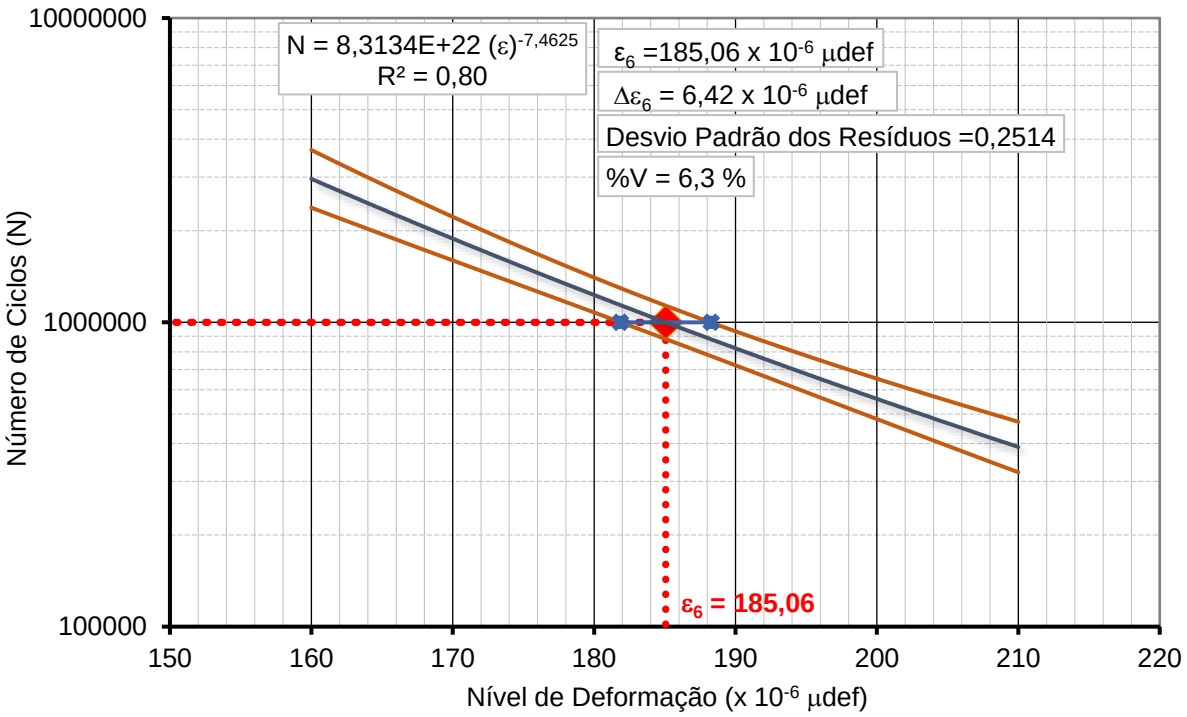


Figura 3.6 – Curva de fadiga da mistura betuminosa EME a 20 ºC e 25 Hz

Fonte: LDTPav (2025a)

Observando a Tabela 3.1, tem-se que as misturas asfálticas GB e EME apresentaram um conjunto de resultados da deformação para 10^6 ciclos (ε_6) em escala crescente com o aumento da temperatura, tomando como referência a condição padrão de teste a 10 ºC e 25 Hz. Portanto, ao analisar os dados das curvas de fadiga em conjunto com as representações gráficas do módulo complexo (E^*), o esclarecimento desta tendência é muito importante para a compreensão adequada dos fenômenos envolvidos.

Considerando as experiências prévias do Grupo de Desenvolvimento e Pesquisa em Pavimentação (GDPPav) estudos sobre o comportamento à fadiga de misturas asfálticas não modificadas no contexto da metodologia francesa (Barra *et al*., 2012; Barra *et al*., 2016; Barra *et al*., 2020; GDPPav, 2015), sejam de módulo elevado ou não, demonstraram que o acréscimo de temperatura implica no decréscimo da ε_6, na região do pico parabólico do plano complexo Cole-Cole.

Logo, para estes casos estudados até então, as conclusões das pesquisas convergem no sentido de apontar que a temperatura correspondente ao pico parabólico do plano Cole-Cole, vinculada à maior dissipação de energia sob a forma de calor, coincidia com a menor escala de ε_6 das curvas de fadiga. E, por esta razão, este princípio se encontra como uma das premissas estabelecidas na subseção 4.5 do RP 032, que trata dos critérios propostos para a inserção da temperatura no dimensionamento de estruturas de pavimento de concreto asfáltico.

Todavia, no transcurso da campanha experimental do TED nº 702/2020, em que foram utilizadas misturas asfálticas formuladas a partir de matrizes de ligantes betuminosos modificados por distintas cadeias de polímeros SBS (vide seções 2.2.1 e 2.2.2 do RP 033), percebeu-se, como já mencionado, o acréscimo da ε_6 com o aumento da temperatura na região do pico parabólico do plano Cole-Cole, contrariando as tendências até então obtidas nas pesquisas anteriores.

Analisando, então, as características das cadeias poliméricas utilizadas na modificação das matrizes betuminosas para a formulação das misturas asfálticas GB e EME, é possível depreender que a inserção do polímero SBS propiciou maior flexibilidade às amplitudes de deslocamento da fase betuminosa, situação corroborada pelos elevados valores e recuperação elástica de ambas as matrizes 60/85 E (90 %) e HiMA (96 %) (vide Tabelas 2.2 e 2.3 do RP 033).

Neste contexto, cabe esclarecer as distinções entre os conceitos de flexibilidade e rigidez, em que a primeiro trata da capacidade de um corpo resistir a uma dada amplitude de movimento sem entrar em estado colapsivo, enquanto a rigidez é uma propriedade mecânica que expressa a capacidade de um corpo ou estrutura de resistir a deformações quando submetido a tensões externas aplicadas (Dabiri *et al*., 2024; Ochoa-Ambriz *et al*., 2022). Portanto, uma elevada rigidez não necessariamente conduz a uma boa flexibilidade de um material e vice-versa.

Assim, mesmo na região com níveis mais acentuados de dissipação de energia, em que ocorre a participação mais intensa da componente viscosa (E_2) no plano complexo Cole-Cole, verificou-se que o ganho adicional de flexibilidade das misturas asfálticas, conferido pela participação polimérica nas matrizes betuminosas, estabelece um regime de compensação à perda de rigidez ocasionada pelo desprendimento de energia sob a forma de calor. Estas tendências de comportamento são corroboradas por Lu *et al*. (2024).

Desta forma, as misturas asfálticas modificadas por polímero, no caso desta pesquisa o SBS, se tornam menos suscetíveis à formação de micro e macrotrincas que conduzem as misturas asfálticas ao colapso estrutural por fadiga, ao contrário do que ocorre com aquelas formuladas com matrizes betuminosas classificadas por penetração e denominadas convencionais, que, ao não disporem deste ganho de flexibilidade adicional, tendem a perder rigidez de forma mais acentuada na região dos picos parabólicos do plano Cole-Cole, ficando menos resistentes ao fenômeno da fadiga.

Verifica-se que esta condição é ainda mais favorável à mistura asfáltica EME quando comparada à GB, pois apresentou maiores valores de ε_6 para uma mesma região de temperatura de teste (Tabela 3.1), em razão do benefício propiciado pelo processo de inversão de fases que ocorre como efeito da inserção de 7,5 % da molécula D0234 do polímero SBS na formação da matriz betuminosa HiMA (vide subseção 2.2.1 do RP 033).

Logo, pelo princípio de absorção de até 10 % do seu peso molecular, o referido processo de inversão pode atingir até 75 % de fase polimérica em relação aos 25 % da fase betuminosa, conferindo maior flexibilidade que a molécula 1101 AT derivada do mesmo SBS, porém, com inserção de apenas 4,0 % na modificação da matriz betuminosa 60/85 E.

Quanto ao intervalo hiperbólico estatístico ($\Delta\varepsilon_6$), verifica-se que todos os valores obtidos (Tabela 3.1) se encontram abaixo de 10 % do valor da ε_6, indicando que a dispersão dos dados experimentalmente determinados está em ótimo nível de aceitação, principalmente nas condições em que as misturas asfálticas se encontram mais afastadas da região do pico parabólico do plano Cole-Cole, isto é, a 10 ºC.

As constatações descritas são corroboradas pelos desvios-padrão dos resíduos (SN), pois apresentaram, em todos os casos, valores bem inferiores a 1,0, indicando o forte grau de aderência dos dados experimentais à curva de fadiga, que atesta a qualidade dos resultados apresentados.

Quanto ao expoente da curva de fadiga (b), tem-se como um indicador da sensibilidade da mistura asfáltica à variação dos níveis de deformação impostos ao material. Assim, considera-se que quanto maior é o expoente, maior também será a variação de ciclos suportados entre os níveis de deformação testados, situação que pode prejudicar a vida de serviço do material em campo.

Entretanto, ao serem observados os valores de "b" em cada curva de fadiga testada, tem-se que, nos menores níveis de deformação, as misturas asfálticas tendem a desprender energia muito lentamente, sendo o comportamento à fadiga muito influenciado pela heterogeneidade da distribuição granulométrica e sua interação com o filme de ligante na região que abrange o terço médio de ruptura dos corpos de prova (vide subseção 3.5 do RP 031). Logo, a rigidez é a propriedade mais dominante.

Por outro lado, a dissipação de energia é muito intensa nas solicitações que comportam os maiores níveis de deformação, prevalecendo a capacidade da mistura asfáltica em suportar maiores efeitos de deslocamento sem atingir o colapso estrutural, em que a flexibilidade é a variável importante.

Por estas razões, a dispersão dos resultados é intrínseca ao comportamento viscoelástico linear das misturas asfálticas, sendo que apenas a análise mecânica não é suficiente para explicá-la em sua plenitude, necessitando tratamentos estatísticos para que haja melhor descrição do fenômeno em parâmetros quantitativos.

Assim, verifica-se que os indicadores conferem um desempenho notável à fadiga das formulações testadas, inclusive em patamares condizentes com as melhores classes de suas respectivas categorias, conforme será informado adiante.

Outro aspecto importante a ser tratado diz respeito ao coeficiente de determinação (R^2) e o desvio-padrão dos resíduos (SN). Em geral, tem-se que curvas de fadiga consideradas com boa distribuição estatística dos resultados devem possuir $R^2 \geq 0{,}80$. Inclusive, esta baliza é indicada na própria norma de fadiga à compressão diametral utilizada pela metodologia MeDiNa (DNIT 183/2018 – ME).

Entretanto, quando se tratam de análises estatísticas em que alguma das variáveis envolvidas não é independente, ou seja, está sujeita à imposição das condições de teste pelo operador do ensaio, o uso do R^2 é inapropriado (Barbetta; Reis; Bornia, 2024). Este é o contexto que ocorre nas curvas de fadiga apresentadas nas Figuras 3.1 a 3.6, pois os níveis de deformação são impostos pelo operador no ato da regulação das amplitudes de deslocamento nos eixos excêntricos. O procedimento adequado nestas condições, então, é avaliar a aderência dos pontos experimentais a partir do desvio-padrão dos resíduos (SN), que deve apresentar valores desejavelmente ≤ 1,0.

Logo, em que pese a maior parte das curvas de fadiga terem obtido um R^2 abaixo de 0,80, este indicador não é adequado para determinar a qualidade da campanha experimental realizada, conforme já abordado. Em contrapartida, todas as curvas apresentaram SN ≤ 1,0, demonstrando boa aderência dos dados experimentais às linhas de tendência do comportamento à fadiga dos materiais testados, validando a campanha experimental realizada pelo critério correto nestes casos.

Portanto, para esta pesquisa específica, a premissa estabelecida na subseção 4.5 do RP 032 não será considerada nas simulações numéricas do RP 035, pelas razões já mencionadas neste documento. Assim, proceder-se-á uma avaliação com todos os resultados obtidos na campanha experimental em conjunto, para que, após uma análise comparativa das soluções apresentadas, pondere-se sobre o cenário mais adequado para aplicação no dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico.

Por fim, os valores alcançados para a ε_6 das misturas GB e EME, a 10 ºC e 25 Hz, foram 116,56 x 10^{-6} μdef e 136,91 x 10^{-6} μdef (Tabela 3.1 e Figuras 3.1 e 3.4), respectivamente. Logo, atendem aos requisitos mínimos exigidos para o enquadramento na classe e GB4 (≥ 100 x 10^{-6} μdef) e EME2 (≥ 130 x 10^{-6} μdef), conforme previsto no Manuel LPC (2007), finalizando as validações das misturas asfálticas formuladas para esta pesquisa como as mais nobres de suas categorias, de acordo com a sequência dos níveis de avaliação previstos na metodologia francesa para a formulação de misturas asfálticas.

4. METODOLOGIA MeDiNA

As misturas asfálticas GB e EME testadas nos níveis de avaliação da metodologia francesa, também foram submetidas aos protocolos experimentais da metodologia Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), conforme fluxograma ilustrado na Figura 4.1.

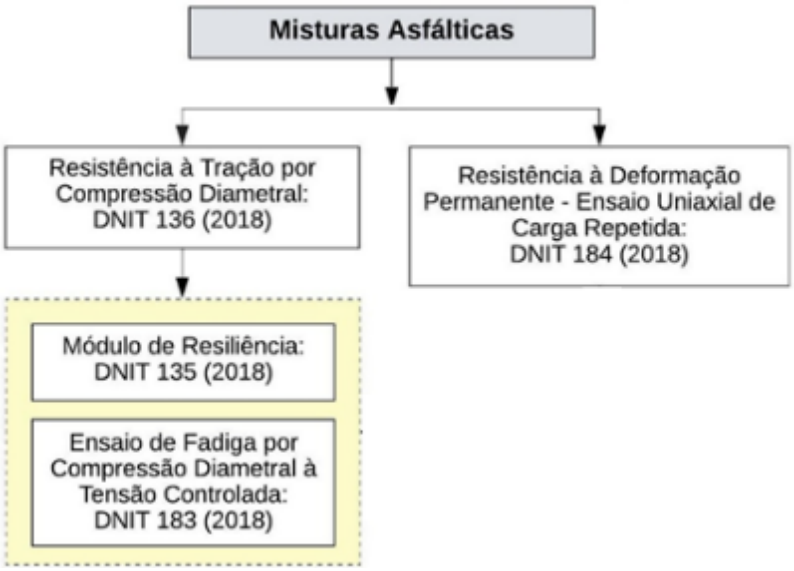


Figura 4.1 – Fluxograma de execução dos ensaios da metodologia MeDiNa

Fonte: LDTPav (2025b)

Tem-se que, para fins de dimensionamento de estruturas de pavimento de concreto asfáltico, o objetivo mais importante da metodologia MeDiNa é determinar os parâmetros do módulo de resiliência e a resistência à fadiga das misturas asfálticas, sendo ambos os ensaios realizados à compressão diametral, em modo dinâmico, com o controle da força. Entretanto, a resistência à tração indireta é requisito prévio e indispensável para a obtenção das propriedades mencionadas, pois estabelece os níveis de tensão de tração horizontal utilizados durante os testes mencionados.

No que diz respeito à deformação permanente, o parâmetro *Flow Number* é avaliado como um critério à parte, pois não é utilizado diretamente na rotina de cálculo das simulações numéricas para dimensionamento, ocorrendo a partir da execução do ensaio uniaxial de carga repetida, em que a mistura asfáltica deve se enquadrar na classe de desempenho requerida pelo método, a qual é função das condições do tráfego e da via – número N, velocidade de solicitação pelo tráfego e, temperatura do revestimento (DNIT, 2023).

Ainda, todos os ensaios previstos no contexto da metodologia MeDiNa para teste de misturas asfálticas foram realizados à temperatura de 25 ºC e frequência de 1 Hz, exceto o *Flow Number*, que especifica a temperatura de 60 ºC.

A Tabela 4.1 apresenta o número mínimo de amostras e as dimensões dos corpos de prova cilíndricos previstos em norma para serem moldados por tipo de ensaio.

Tabela 4.1 – Quantitativo mínimo previsto de amostras por tipo de mistura asfáltica considerando a metodologia MeDiNa

Ensaio	Norma	Amostras Cilíndricas	
		Dimensões	Quantidades
Resistência à tração por compressão diametral	DNIT 136/2018 – ME	Altura entre 6,2 cm e 6,5 cm e diâmetro de 10,0 cm ± 0,2 cm	3
Módulo de resiliência	DNIT 135/2018 – ME		3
Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada	DNIT 183/2018 – ME		12
Ensaio uniaxial de carga repetida (resistência à deformação permanente) *Flow Number*	DNIT 184/2018 – ME	Altura de 15,0 cm ± 0,25 cm e diâmetro de 10 ± 0,2 cm	5*

*Não há uma amostragem mínima especificada para este ensaio em qualquer procedimento normativo oficial brasileiro. Logo, adotou-se nesta pesquisa o quantitativo indicado, para fins de testes realizados com as misturas asfálticas formuladas.

Fonte: LDTPav (2025b)

Todavia, considerando os dois tipos de formulação previstos na campanha experimental (GB e EME), com o intuito de estabelecer uma série amostral com boa representatividade estatística, o seguinte quantitativo foi considerado em cada ensaio e por mistura asfáltica, destacando que os números informados são apenas aqueles que constituíram o conjunto amostral validado estatisticamente, tendo sido testado na prática um volume muito maior de corpos de prova:

- Resistência à tração: 52 corpos de prova (26 por formulação);
- Módulo de resiliência: 40 corpos de prova (20 por formulação);
- Fadiga: 30 corpos de prova (15 por formulação);
- *Flow Number*: 10 corpos de prova (5 por formulação).

Todos os corpos de prova destinados aos ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência e fadiga à compressão diametral, foram compactados com o uso da prensa de compactação giratória (PCG) (Figura 4.2), disponível no Laboratório de Pavimentação (LabPav) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Florianópolis, com volume de vazios (%V) final de 4,0 % ± 0,5 %. No caso das amostras destinadas aos ensaios uniaxiais de carga repetida (*Flow Number*), também produzidas no LabPav, tem-se que o grau de compacidade obtido para os corpos de prova foi de 97,0 ± 0,5 % da densidade aparente de projeto (G_{mb}) das respectivas misturas asfálticas, ou seja, da G_{mb} com %V a 4,0 %.



Figura 4.2 – PCG do LabPav/UFSC (Florianópolis/SC)

Fonte: Melo (2014)

A execução dos ensaios supracitados ocorreu nas instalações do LDTPav da UFSC, Campus Joinville, que dispõe do equipamento MA-250 (Figura 4.3), fabricado pela empresa nacional Owntec®, capaz de executar todos os testes de misturas asfálticas, conforme previsto pela metodologia MeDiNa.

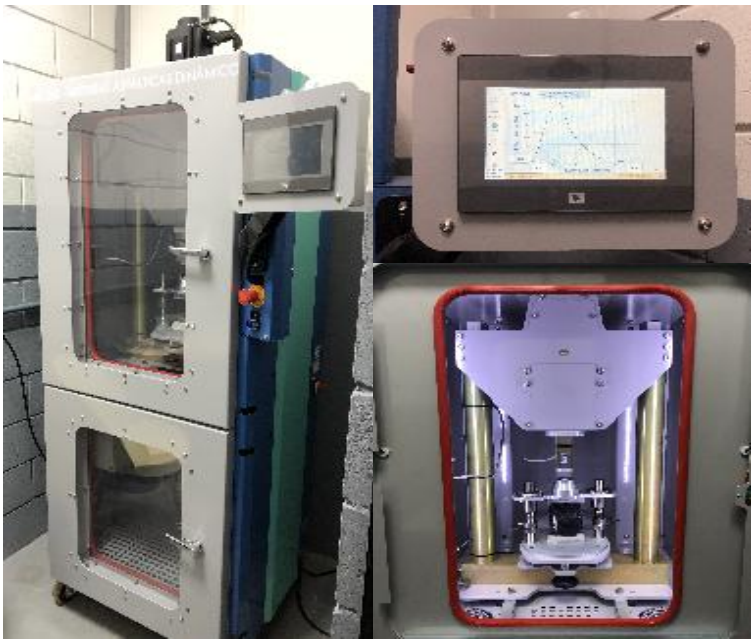


Figura 4.3 – Equipamento MA-250

Fonte: LDTPav (2025b)

4.1 METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas seções seguintes, serão apresentados, de forma breve, os princípios conceptivos e de aplicação dos ensaios previstos no protocolo experimental da metodologia MeDiNa para o estudo das misturas asfálticas, bem como os resultados obtidos na campanha experimental em cada caso.

4.1.1 TRAÇÃO INDIRETA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

No contexto da metodologia MeDiNa, o objetivo da determinação da resistência à tração indireta das misturas asfálticas por meio do ensaio de compressão diametral (DNIT 136/2018 – ME), é definir a carga a ser aplicada nos ensaios de módulo resiliente e fadiga.

Os corpos de prova possuem formato cilíndrico, obedecendo as dimensões indicadas na Tabela 4.1. Os testes foram realizados a 25 °C ± 0,5 °C, com carga vertical de compressão aplicada monotonicamente a uma velocidade de 0,8 mm/s ± 0,1 mm/s (Figura 4.4). Os deslocamentos verticais e a carga de ruptura foram registrados por um sistema de aquisição de dados computadorizado, no equipamento MA-250 (Figura 4.3).

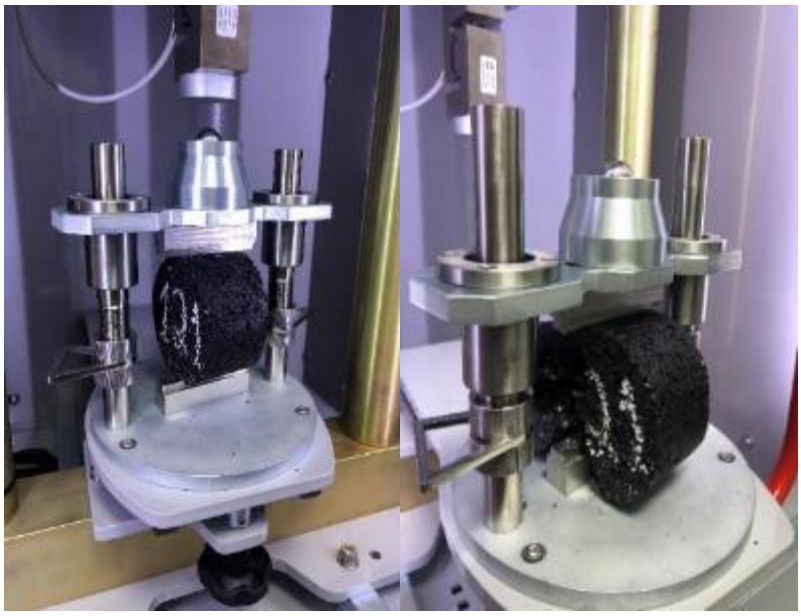


Figura 4.4 – Ensaio de tração indireta à compressão diametral

Fonte: LDTPav (2025b)

A resistência à tração indireta de cada corpo de prova foi calculada pela Equação 4.1.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (4.1)$$

Em que:

σ_R é a resistência à tração, em MPa;

F é a carga aplicada, em N;

D é o diâmetro do corpo de prova, em mm;

H é a altura do corpo de prova, em mm.

Para o cálculo da σ_R, tanto a altura (H) quanto o diâmetro (D) dos corpos de prova foram medidos com paquímetro, em quatro posições equidistantes, sendo adotado como valor a média aritmética das quatro leituras.

Os resultados obtidos indicaram uma $\sigma_{Rmédia}$ para as misturas asfálticas GB e EME de 2,00 MPa e 1,95 MPa, respectivamente, ambos bem superiores ao mínimo de 0,65 MPa previsto na especificação de serviço DNIT 031/2004 – ES. Maiores detalhes acerca dos dados experimentais obtidos nos ensaios, bem como as variáveis estatísticas calculadas, podem ser visualizados no Apêndice C (Tabelas AP C1 e AP C2).

4.1.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

O módulo de resiliência (MR) das misturas asfálticas é uma propriedade indicativa da sua rigidez, definido pela relação entre as magnitudes da tensão aplicada repetidamente e a deformação específica recuperável (Motta, 2009). Destaca-se que o módulo de resiliência é um dos parâmetros utilizados diretamente como dado de entrada na rotina numérica de dimensionamento pela metodologia MeDiNa. Portanto, sua determinação nesta campanha experimental é imprescindível.

A determinação do MR foi realizada conforme especifica a norma DNIT 135/2018 – ME, considerando as amostras características indicadas na Tabela 4.1, também cumprindo o binário de temperatura a 25 ºC ± 0,5 ºC e frequência de aplicação da carga a 1 Hz, compreendendo período de carregamento de 0,1 s e descarregamento (repouso) de 0,9 s. A carga aplicada (P) nos ensaios considerou uma tensão induzida de tração horizontal correspondente a 15,0 % da resistência à $\sigma_{Rmédia}$ de cada mistura asfáltica testada (GB e EME), respeitando o intervalo normativo de 5,0 % $\leq \sigma_{Rmédia} \leq$ 25,0 %. O valor de 15,0 % foi estabelecido para que um nível de tensão intermediário ao intervalo preconizado em norma fosse utilizado, evitando que os resultados experimentais fossem afetados por sensibilidade e imprecisões técnicas que decorrem de se trabalhar próximo aos extremos dos intervalos normativos.

A medição do deslocamento horizontal (ΔH) foi realizada com o uso de sensores tipo *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) externos, posicionados diametralmente opostos ao corpo de prova por alça de referência (Figura 4.5). Como coeficiente de Poisson (μ), adotou-

se o valor de 0,30 para todas as misturas, obedecendo às diretrizes normativas do ensaio. Assim, o módulo de resiliência de cada corpo de prova foi então calculado a partir da Equação 4.2.



Figura 4.5 – Ensaio de módulo resiliente à compressão diametral

Fonte: LDTPav (2025b)

$$\mathrm{MR} = \frac{\mathrm{P}}{|\Delta \mathrm{H}|\mathrm{t}}(0{,}2692 + 0{,}9976\mu) \tag{4.2}$$

Em que:

MR é o módulo de resiliência, em MPa;

P é a carga cíclica, em N;

ΔH é o deslocamento horizontal elástico;

t é a altura do corpo de prova, em mm;

μ é o coeficiente de Poisson (0,30).

Nos cálculos do módulo de resiliência, a altura (t) dos corpos de prova foi medida com paquímetro em quatro posições equidistantes, sendo adotado como valor final a média aritmética das quatro leituras.

Os resultados obtidos indicaram $MR_{médio}$ para as misturas asfálticas GB e EME de 7707 MPa e 6030 MPa, respectivamente. Maiores detalhes acerca dos dados experimentais obtidos nos ensaios, bem como as variáveis estatísticas calculadas, podem ser visualizados no Apêndice D (Tabelas AP D1 e AP D2).

4.1.3 FADIGA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

O fenômeno da fadiga é o processo pelo qual a mistura asfáltica se deteriora quando submetida a um estado de tensões e de deformações repetidas, resultando em colapso estrutural, após um número suficiente de repetições de carregamento (Khalid, 2000).

Atualmente, existem diversos procedimentos para determinar a resistência à fadiga de misturas asfálticas, sendo que na metodologia MeDiNa é utilizado o ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada (DNIT 183/2018 – ME). O modelo de fadiga obtido no referido ensaio é o parâmetro de entrada nas rotinas numéricas de dimensionamento. Neste contexto, a determinação dos modelos de fadiga das misturas asfálticas GB e EME testadas na campanha experimental desta pesquisa é indispensável.

Portanto, a resistência à fadiga das misturas asfálticas GB e EME foi determinada se utilizando como base a $\sigma_{Rmédia}$ proporcional de cada formulação, de modo a respeitar o intervalo normativo de 5,0 % $\leq \sigma_{Rmédia} \leq$ 40,0 % (DNIT 183/2018 – ME), devendo ser escolhidos pelo menos quatro níveis de tensão pelo projetista, para testes com corpos de prova moldados conforme as características descritas na Tabela 4.1. A temperatura e frequência de teste seguiu a mesma parametrização do ensaio de módulo de resiliência descrito na subseção 4.1.2. Entretanto, os corpos de prova foram solicitados até a ocorrência da ruptura completa (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Ensaio de fadiga à compressão diametral

Fonte: LDTPav (2025b)

Cabe ressaltar que os níveis de tensão escolhidos para teste nesta pesquisa foram de 20,0 %, 25,0 %, 30,0 %, 35,0 % e 40,0 %, pois abaixo de 20,0 % as amplitudes das deformações específicas resultantes são muito pequenas para as formulações de alto desempenho desenvolvidas (25 a 30 x 10^{-6} a 10,0 %, por exemplo), não sendo compatíveis com as condições mais críticas de solicitação em campo (≥ 80 x 10^{-6}), além de elevar demais o tempo (acima de um mês, por exemplo) de obtenção de resultados para apenas um corpo de prova. A partir dos resultados obtidos, os modelos de fadiga das misturas asfálticas foram expressos na relação estabelecida entre o número de ciclos (N) de solicitação e a deformação específica resiliente de tração (ε_t) resultante (Equação 4.3), considerando que o *software* da metodologia MeDiNa permite apenas esta relação como válida para entrada nas rotinas numéricas de dimensionamento, conforme ilustrado na Figura 4.7 e na Figura 4.8.

$$\mathrm{N} = k_1(\varepsilon_t)^{k_2} \tag{4.3}$$

Em que:

N é o número de ciclos;

ε_t é a deformação de tração;

$k1$ e $k2$ são parâmetros experimentais.

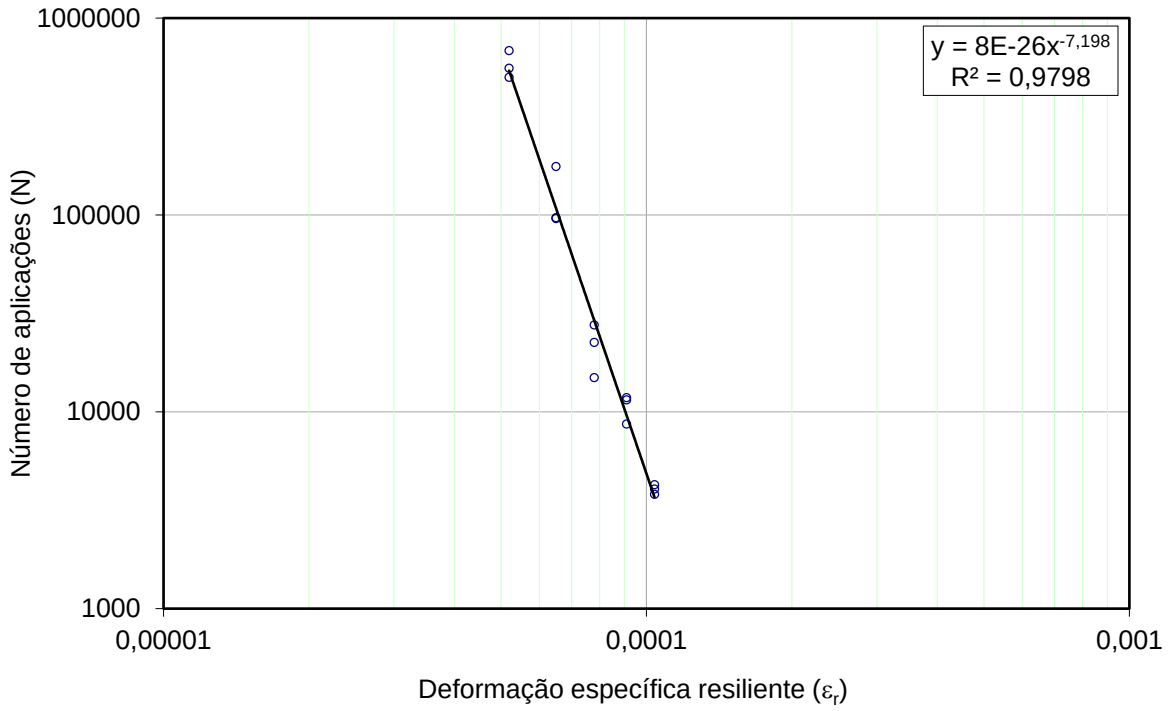


Figura 4.7 – Curva de fadiga à compressão diametral da mistura asfáltica GB

Fonte: LDTPav (2025b)

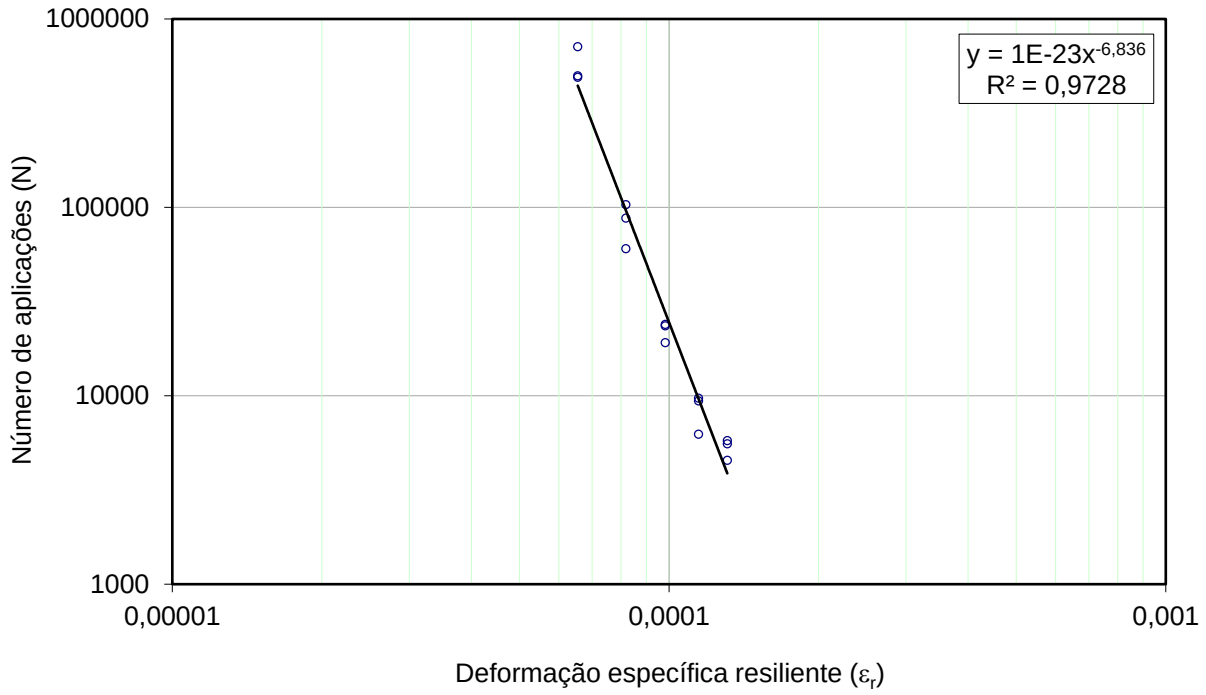


Figura 4.8 – Curva de fadiga à compressão diametral da mistura asfáltica EME

Fonte: LDTPav (2025b)

De posse das equações do modelo de fadiga, foi possível determinar o Fator de Fadiga da Mistura (FFM) para cada formulação (Equações 4.4 a 4.6). Ainda, verificou-se que o coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,9798 e 0,9728 para as misturas asfálticas GB e EME, respectivamente, estando bem superiores ao mínimo indicado de 0,80 pela norma DNIT 183/2018 – ME. Entretanto, cabe destacar as ressalvas já abordadas na subseção 3.1 quanto a adotar o R^2 para estas características de ensaio.

$$\mathrm{FFM} = 0{,}2.\,[log(N_{100}) + \log(N_{250}) \quad (4.4)$$

$$N_{100} = k_1.\,100\mu^{k_2} \quad (4.5)$$

$$N_{250} = k_1.\,250\mu^{k_2} \quad (4.6)$$

Em que:

FFM é o fator de fadiga da mistura;

$N_{100;}\ N_{250}$ é o número de ciclos correspondentes ao nível de 100 e 250 microdeformações;

$k1$ e $k2$ são os parâmetros experimentais do modelo da curva de fadiga;

μ é a microdeformação (x 10^{-6}).

Considerando os dados obtidos na campanha experimental (Apêndice E, Tabelas AP E1 e AP E2), o FFM determinado para as misturas asfálticas GB e EME foi de 0,90 e 1,19, respectivamente. Associando os valores de FFM aos do módulo resiliente (MR) já informados na subseção 4.1.2, definiu-se a classe das misturas asfálticas (Figura 4.9).

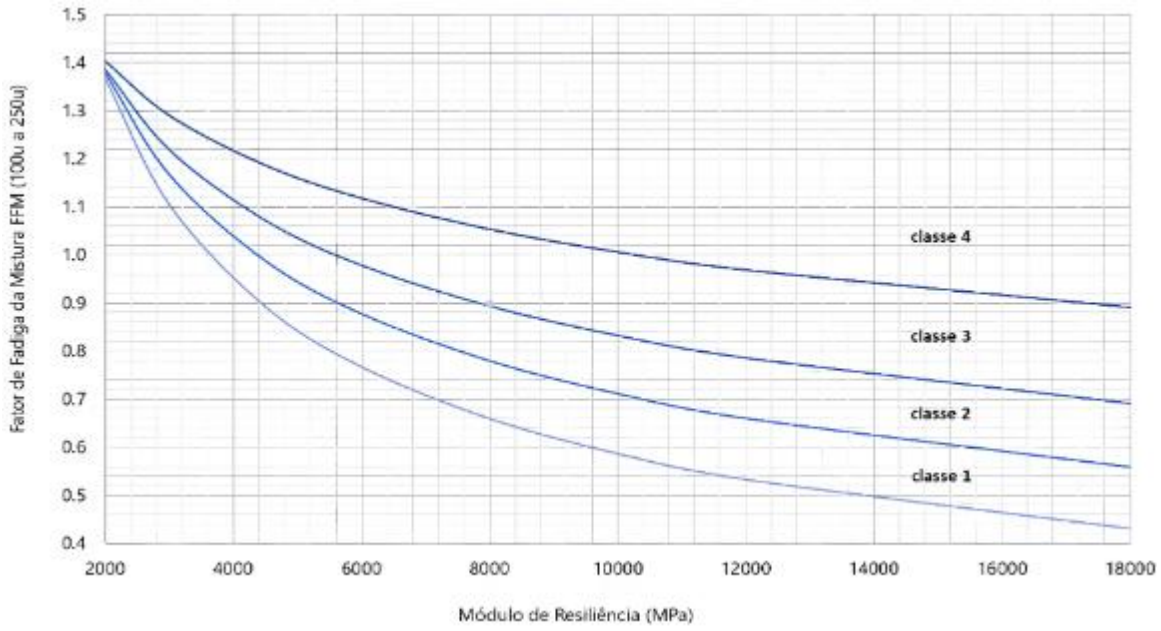


Figura 4.9 – Classes de desempenho das misturas asfálticas correlacionando MR x FFM

Fonte: DNIT (2023)

Desta forma, depreende-se que a mistura asfáltica GB e EME foram enquadradas nas classes 2 e 4, respectivamente, de acordo com as diretrizes do DNIT (2023).

4.1.4 ENSAIO UNIAXIAL DE CARGA REPETIDA – *FLOW NUMBER*

Para a verificação da resistência à deformação permanente das formulações GB e EME no escopo da metodologia MeDiNa, foram seguidos os procedimentos normativos constantes da norma DNIT 184/2018 – ME, considerando a aplicação de carregamento repetido à compressão uniaxial.

As características dos corpos de prova destinados aos testes se encontram descritas na parte introdutória do Capítulo 4. A execução do procedimento experimental se dá após o condicionamento prévio das amostras em uma câmara com temperatura regulada a 60 °C por, no mínimo, 3 horas, sendo acoplados dois sensores de Transformador Diferencial Variável Linear (*Linear Variable Differential Transformer*, LVDT) diametralmente opostos, que terão a função de captar os deslocamentos resultantes da aplicação do carregamento à compressão uniaxial (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Ensaio uniaxial de carga repetida

Fonte: LDTPav (2025b)

Em seguida, dois estágios são cumpridos, em que o primeiro é denominado condicionamento, a uma carga de compressão de 10,2 ± 0,5 kPa por 60 s, e na sequência, ocorre a aplicação do carregamento para a determinação do *Flow Number*, na ordem de 204,0 ± 4 kPa. Em ambos os casos, os ciclos possuem duração de 1,0 s, sendo 0,1 s do pulso de carregamento e 0,9 s de repouso da amostra, correspondente à frequência de 1 Hz.

A deformação permanente acumulada na aplicação do carregamento, também denominada como deformação plástica (ε_p) pela norma que rege o ensaio, é dividida em três zonas: primária, secundária e terciária. São interpretadas da seguinte forma: (i) na primária, a densificação da amostra ocorre a uma taxa elevada, (ii) na secundária, a taxa de deformação é praticamente constante e, (iii) na terciária (cisalhamento com volume constante), no ponto de transição em que ocorre a menor taxa de deformação plástica, determina-se o *Flow Number* (FN). Logo, o FN é o número do ciclo em que a taxa de deformação plástica é mínima e a partir do qual o corpo de prova atinge a ruptura (Figura 4.11).

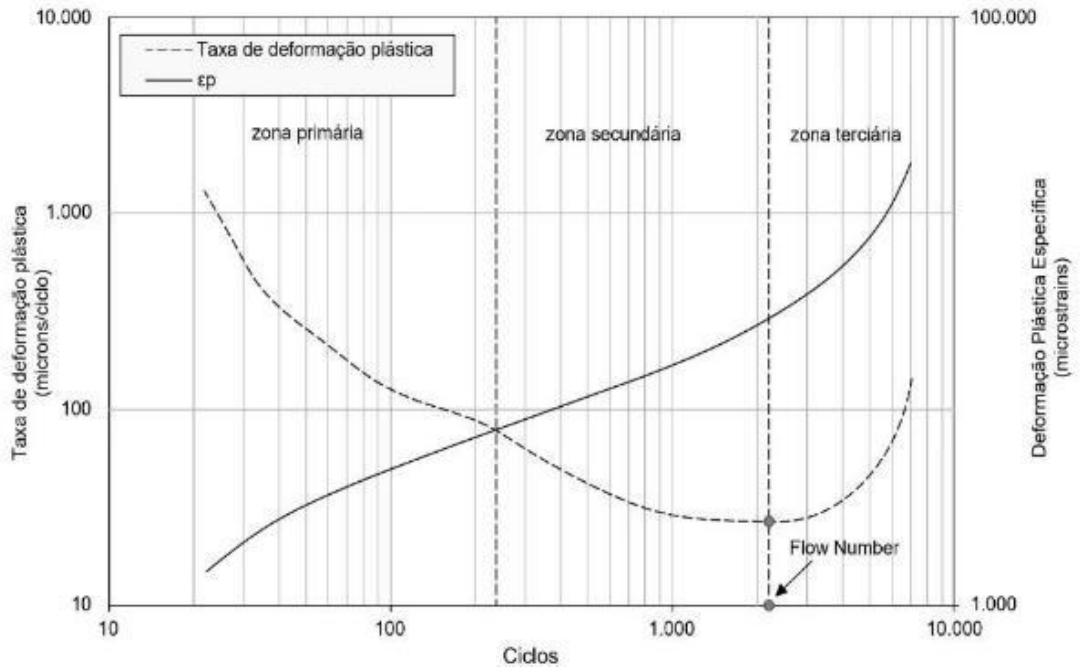


Figura 4.11 – Zonas de avaliação da evolução da deformação permanente para determinação do Flow Number

Fonte: DNIT 184/2018 – ME

O encerramento do ensaio é caracterizado por dois critérios, sendo estes: ruptura do corpo de prova, identificada pelo atingimento da zona terciária na curva de deformação plástica (Figura 4.12), ou; o número de ciclos atinge a marca de 7200 sem que tenha ocorrido a ruptura do corpo de prova (aproximadamente 2 horas de carregamento cíclico).



(a) (b)

Figura 4.12 – Corpo de prova (a) antes do ensaio e (b) depois de atingir a zona terciária na curva de deformação plástica

Fonte: LDTPav (2025b)

O FN determinado é, então, comparado à uma classificação de desempenho (Tabela 4.2) que correlaciona a faixa de número N que a mistura asfáltica estaria apta a suportar sem a ocorrência de deformação permanente, considerando a condição de solicitação pelo tráfego (normal ou severa) e a temperatura superficial da camada asfáltica na estrutura do pavimento (moderada ou elevada).

Tabela 4.2 – Relação entre o FN e as condições de tráfego em campo (N) pela metodologia MeDiNa

Classe	*Flow Number* (FN)	N recomendado Condições normais	N recomendado Condições severas
1	$FN \geq 100$ ciclos	$N < 10^6$	Não recomendado
2	100 ciclos $\leq FN <$ 300 ciclos	$10^6 \leq N < 10^7$	$N < 10^6$
3	300 ciclos $\leq FN <$ 750 ciclos	$10^7 \leq N < 10^8$	$10^6 \leq N < 10^7$
4	750 ciclos $\leq FN <$ 2.000 ciclos	$N \geq 10^8$	$10^7 \leq N < 10^8$
5	$FN \geq$ 2.000 ciclos	-	$N \geq 10^8$

Fonte: DNIT (2023)

Portanto, para que ocorra a validação final do FN da mistura asfálticas testada, tem-se que o valor obtido precisa estar situado em uma dada classe de desempenho, de maneira que o número N recomendado na Tabela 4.2 seja maior ou igual ao especificado no estudo de tráfego do projeto da estrutura de pavimento, independentemente da condição considerada (normal ou severa). Do contrário, a mistura asfáltica não atende aos critérios estabelecidos para resistir à deformação permanente no campo e não deveria ser considerada para utilização em solução de dimensionamento.

Quanto à condição “Normal” de tráfego, tange aos casos em que se tem velocidades aplicadas acima de 60 km/h, em vias sem interseção, terceira faixa e/ou temperatura máxima do revestimento asfáltico moderada. Por outro lado, a condição “Severa” implica em tráfego lento, com velocidade abaixo de 60 km/h, interseções, terceira faixa, praças de pedágio, tráfego canalizado, paradas de ônibus e/ou temperatura máxima elevada do revestimento.

Além disso, a temperatura máxima moderada significa aquela inferior a 64 ºC, apresentada pelo revestimento asfáltico a 20 mm de profundidade, considerando a média máxima de sete dias consecutivos. A mesma lógica vale para a temperatura máxima elevada, porém, quando o valor da média se situa acima de 64 ºC.

O FN médio da mistura asfáltica GB foi de 2446 (Tabela 4.3 e Figuras 4.13 a 4.17). No caso da EME, o FN foi de 7200, em razão de todos os corpos de prova testados terem atingido esta marca sem que houvesse a ocorrência de ruptura por cisalhamento do material, conforme critério estabelecido normativamente para o ensaio. Logo, no que diz respeito à mistura asfáltica EME, não foi alcançada a zona terciária ilustrada na Figura 4.11 e, por essa razão, os gráficos não se encontram ilustrados neste produto.

Tabela 4.3 – Compilação dos resultados do FN da mistura asfáltica GB

Mistura asfáltica	CP	*Flow Number*	
		FN	Classe
GB	1	2380	5
	2	2400	
	3	2900	
	4	2410	
	5	2140	
Média			2446
Desvio-Padrão			248
CV (%)			10,1

Fonte: LDTPav (2025b)

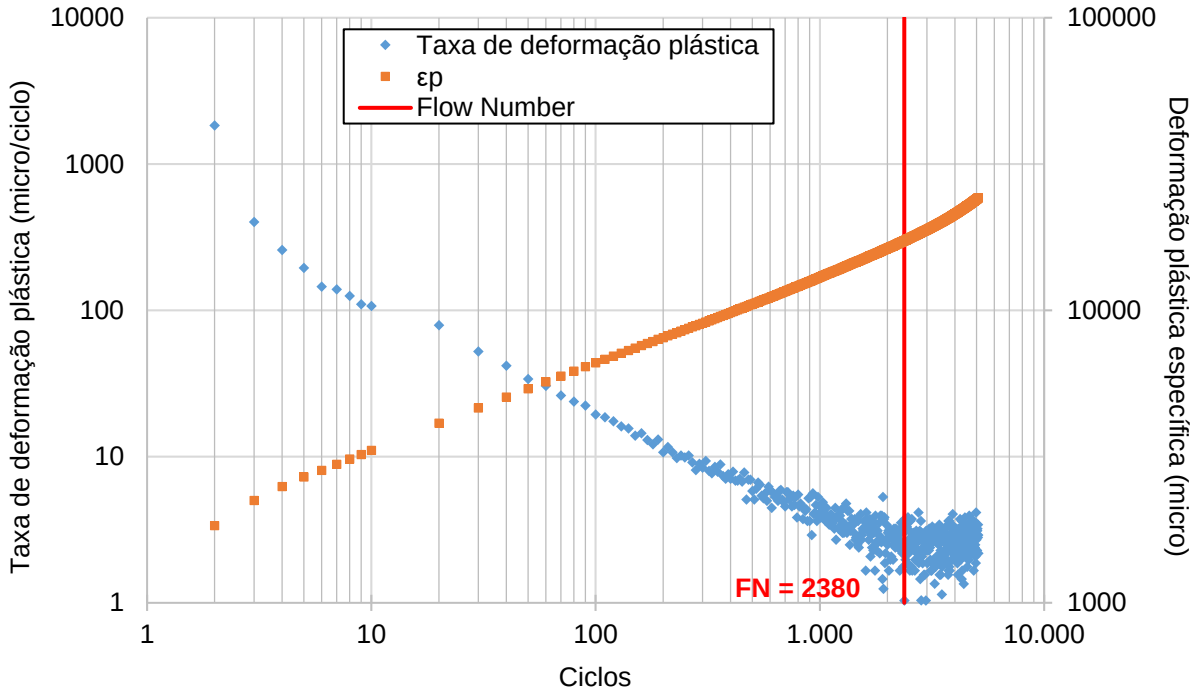


Figura 4.13 – Flow Number da mistura asfáltica GB (CP 1)

Fonte: LDTPav (2025b)

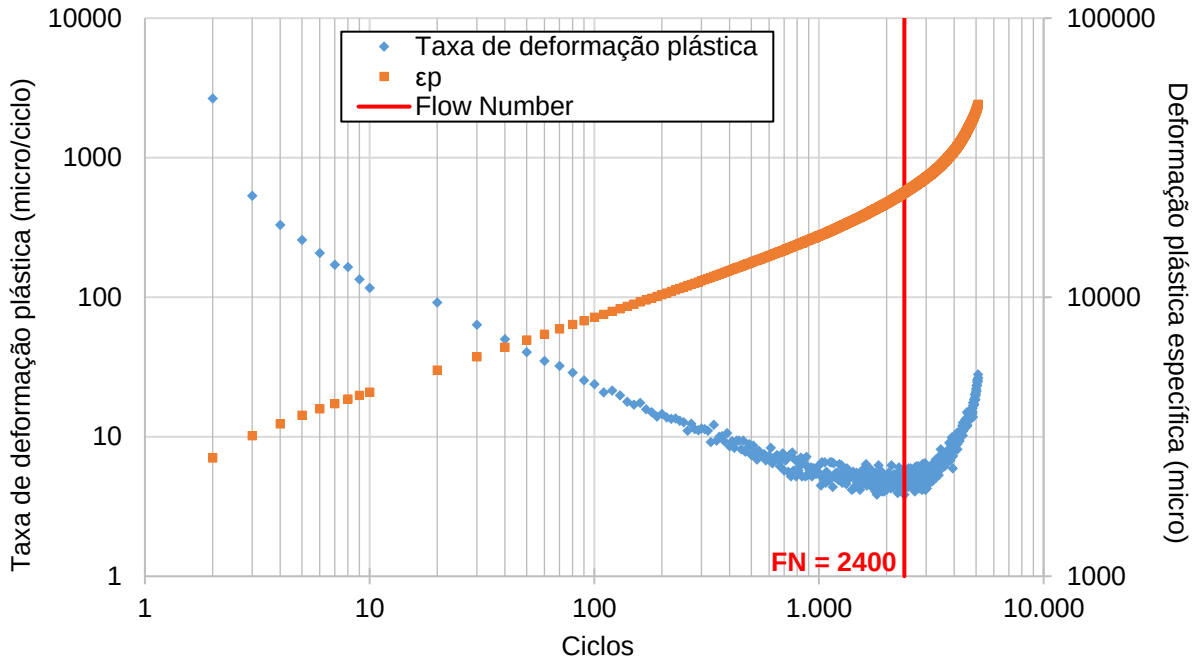


Figura 4.14 – Flow Number da mistura asfáltica GB (CP 2)

Fonte: LDTPav (2025b)

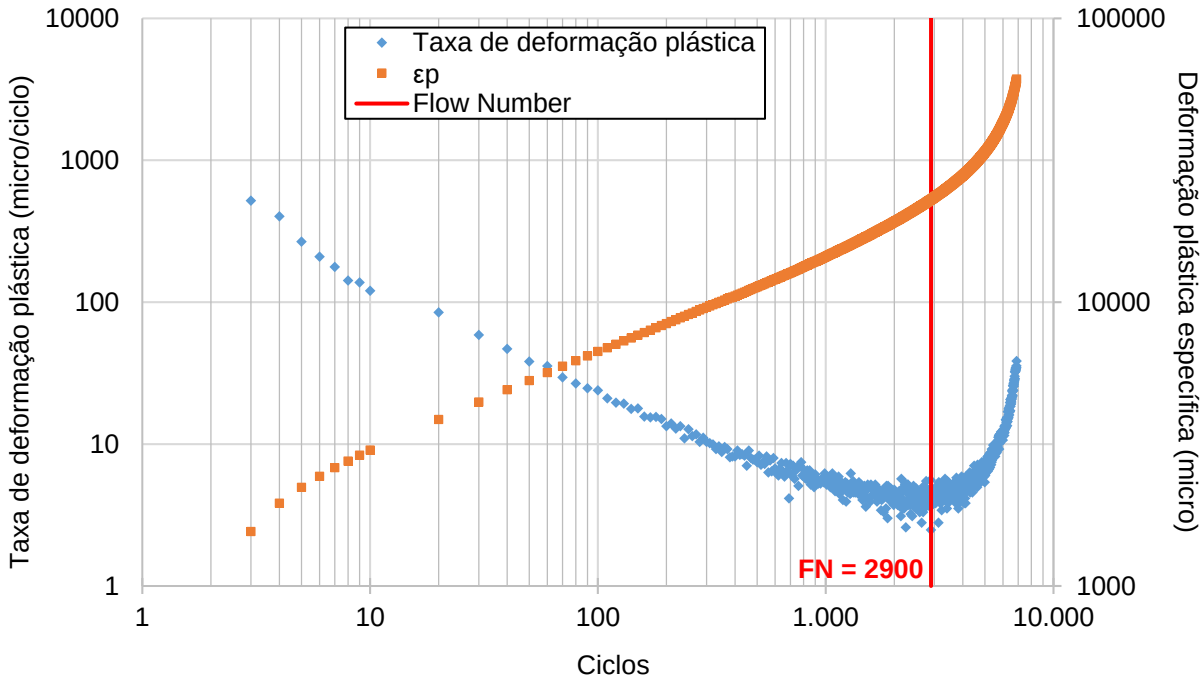


Figura 4.15 – Flow Number da mistura asfáltica GB (CP 3)

Fonte: LDTPav (2025b)

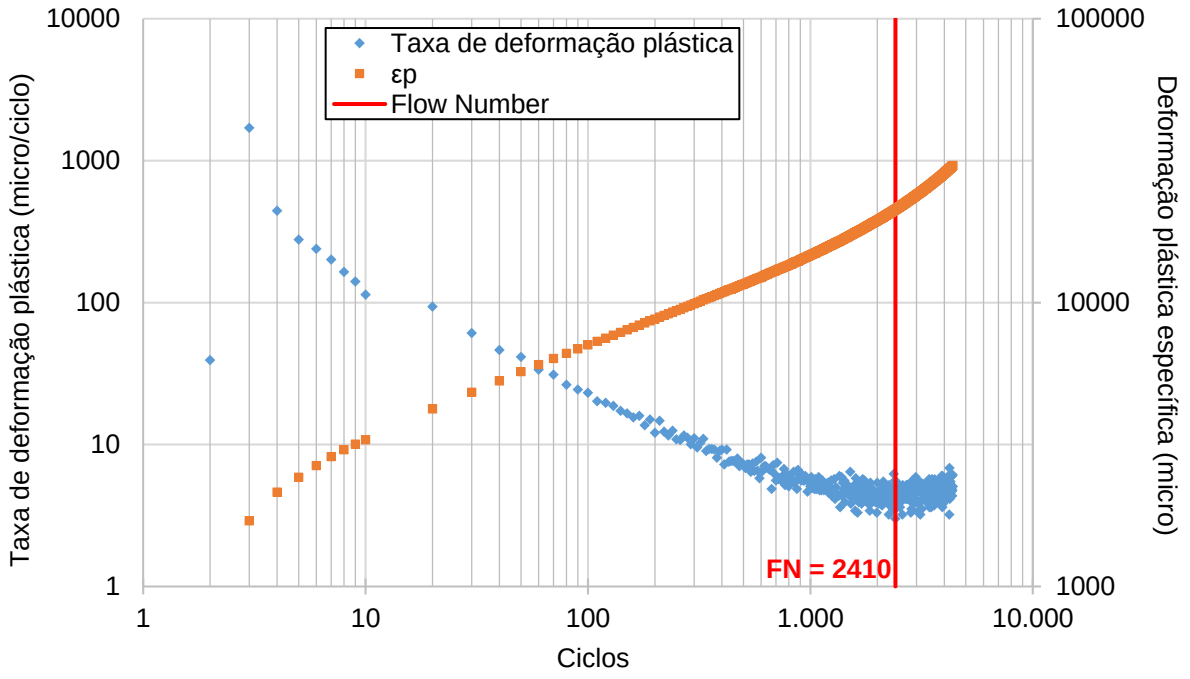


Figura 4.16 – Flow Number da mistura asfáltica GB (CP 4)

Fonte: LDTPav (2025b)

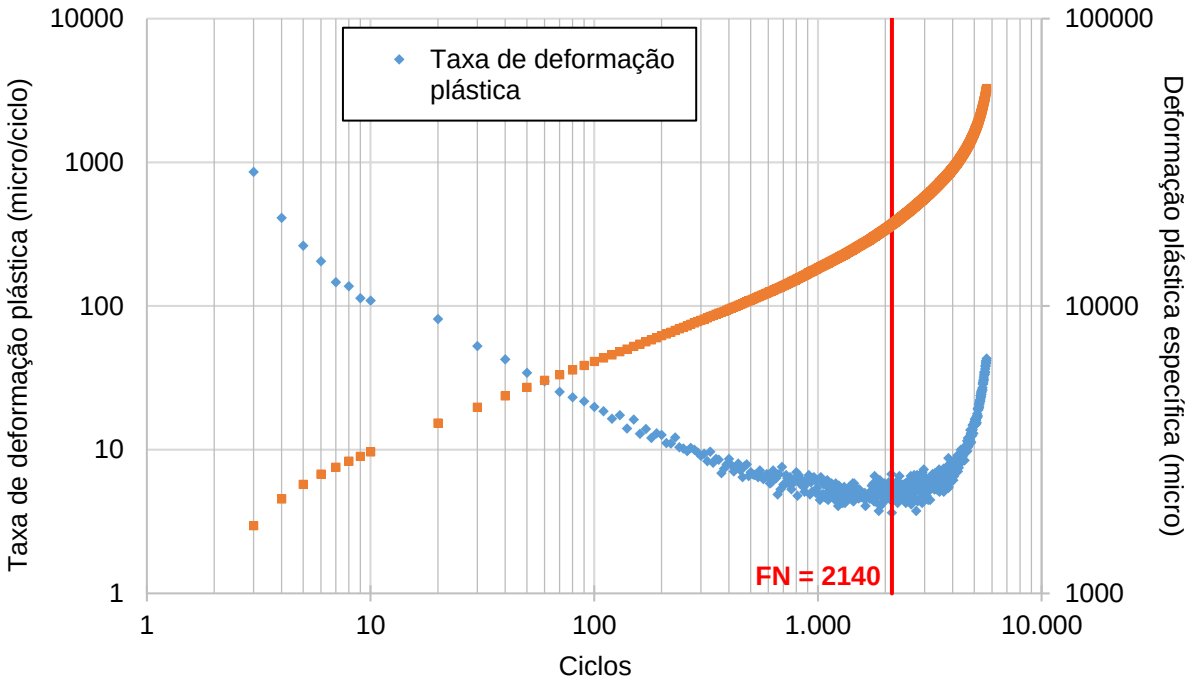


Figura 4.17 – Flow Number da mistura asfáltica GB (CP 5)

Fonte: LDTPav (2025b)

Os resultados obtidos indicam que ambas as misturas asfálticas, GB e EME, estão classificadas na classe 5 de desempenho à deformação permanente ($FN \geq 2000$ ciclos, exposto na Tabela 4.2Tabela), isto é, a mais nobre definida pela metodologia MeDiNa, apta para suportar solicitações de tráfego com $N \geq 10^8$, ratificando, mais uma vez, a elevada qualidade e desempenho das formulações desenvolvidas para esta pesquisa.

A partir da campanha experimental realizada, tem-se a seguinte compilação dos resultados obtidos para as misturas asfálticas GB e EME, considerando o escopo da metodologia MeDiNa (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Compilação dos resultados obtidos no âmbito da metodologia MeDiNa

Mistura asfáltica	Tração indireta (MPa)	Módulo resiliente (MPa)	Fadiga				*Flow Number*	
			FFM	Classe	k_1	k_2	FN	Classe
GB	2,00	7707	0,90	2	8E-26	-7,198	2446	5
EME	1,95	6030	1,19	4	1E-23	-6,836	7200	5

Fonte: LDTPav (2025b)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o conjunto dos resultados obtidos na primeira e segunda etapa da campanha experimental realizada, bem como o contexto das discussões técnicas apresentadas, conclui-se que foram alcançados integralmente os objetivos traçados até o momento, destacando-se a demonstração prática do elevado desempenho reológico e mecânico das misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume (GB) e Enrobé à Module Élevé (EME), de graduação 0/20 mm, formuladas para esta pesquisa.

Neste contexto, é importante enfatizar que ambas as misturas asfálticas formuladas (GB e EME) atenderam aos maiores padrões de qualidade exigidos pelos critérios estabelecidos nas metodologias francesa e Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), alcançando a classificação GB4, EME2 e classe 4, respectivamente. Portanto, estão aptas a serem utilizadas em soluções de dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico nas condições mais severas de tráfego e clima.

No contexto da metodologia francesa, nesta segunda etapa experimental, dois aspectos importantes foram verificados durante as análises realizadas, quais sejam: a influência decisiva das tecnologias envolvidas na produção das cadeias moleculares do polímero SBS na formação das matrizes betuminosas 60/85 E (1101 AT), HiMA (D0243) e o critério para a escolha da temperatura crítica quanto ao desempenho mecânico e reológico das misturas asfálticas, para fins de dimensionamento.

Quanto ao polímero SBS, os resultados apresentados ratificaram, de forma comprovada, a demonstração de que a diminuição de elementos estruturais em tribloco e respectivo aumento de diblocos, aliada ao acoplamento de grupos vinílicos de dupla ligação ao longo das cadeias polibutadiênicas, acarreta: na redução da viscosidade da matriz betuminosa para níveis próximos das condições tradicionais de modificação; na possibilidade do aumento do percentual de polímero no processo de modificação; e na melhor absorção das frações maltênicas pela molécula polimérica, devido à reticulação mais efetiva gerada pelos grupos vinílicos.

Como resultado, a matriz betuminosa HiMA, incorporada na formulação da mistura asfáltica EME, apresentou uma tendência contínua de maior amplitude dos valores da componente elástica ($E1$), bem como menor retardo na resposta aos esforços solicitantes aplicados, correspondentes à conservação de energia e ao ângulo de fase das misturas asfálticas no plano complexo, em comparação à 60/85 E, utilizada na mistura asfáltica GB.

Ainda, devido à cadeia molecular SBS 1101AT da matriz betuminosa 60/85 E possuir uma maior quantidade de triblocos em sua estrutura, bem como um aporte desprezível de grupos vinílicos em relação à SBS D0243 utilizada na produção do HiMA, conforme discutido no RP 033, esta confere menor flexibilidade à mistura asfáltica GB na mesma razão de amplitude de deslocamento quando comparada à EME.

Assim, a mistura asfáltica GB ao desprender maior esforço mecânico para suportar os esforços aplicados, dissipa mais energia que a EME na resposta aos ciclos de carregamento, situação observada na maior escala dos valores da componente viscosa ($E2$) e respectivas temperaturas situadas na região do pico parabólico do plano complexo Cole-Cole, além dos maiores ângulos de fase no espaço de Black.

Este cenário implica diretamente na resistência à fadiga das formulações, pois ao possuir maior flexibilidade às amplitudes de deslocamento gerados e menor desprendimento de energia, a mistura asfáltica EME perde rigidez de forma mais gradativa, suportando maiores quantidades de ciclos de carregamento solicitante ao longo do tempo em relação à GB, resultando na obtenção de maiores valores de ε_6 para uma mesma temperatura de teste.

Desta forma, a temperatura crítica a ser adotada por esta pesquisa nas rotinas numéricas de dimensionamento, considerando as condições e o tempo disponível de testes da campanha experimental apresentada, será a correspondente ao menor valor de ε_6 obtido, pois a deformação é a variável que rege a fadiga das misturas asfálticas, bem como é o principal dano que conduz estes materiais ao colapso no campo.

Deve ser esclarecido que as tendências apontadas por esta pesquisa quanto às misturas asfálticas formuladas com ligantes modificados por polímero SBS, constituem situações que necessitariam de maior quantidade de testes para a determinação de uma ampla varredura de ε_6, fato incompatível com o tempo disponível para o cumprimento dos prazos da pesquisa. Porém, os resultados obtidos, ao se encontrarem dentro da perspectiva do respeito às normas da metodologia francesa, chancelam as considerações aqui realizadas e as suas aplicações nas rotinas numéricas para dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico.

No que diz respeito à metodologia MeDiNa, é possível concluir que apesar de ter apontado as misturas asfálticas GB e EME como as de melhor classe de desempenho frente aos critérios adotados em seu escopo, esta dispõe de um arcabouço experimental com pouca credibilidade científica, fato já comprovado de longa data por pesquisas em âmbito internacional (Di Benedetto *et al*., 2003; Khalid, 2000; Chailleux; De La Roche; Piau, 2011). Ainda, a metodologia não permite simular as condições de solicitação das misturas asfálticas de maneira próxima ao que ocorre na prática, inviabilizando o estabelecimento de estreita relação campo-laboratório, acarretando na falta de confiabilidade dos resultados obtidos. Estas considerações ficarão bem evidentes na discussão dos resultados e respectivas conclusões apresentadas no RP 034.

APÊNDICE

APÊNDICE A – MÓDULO COMPLEXO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS GB E EME

Tabela AP A1 – Resultados da análise reológica da mistura asfáltica GB (continua)

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de armazenamento	Módulo de perda	Módulo complexo	Ângulo de fase
		E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	$\|E^*\|$ (MPa)	δ (°)
-10	1	16585	1196	16628	4,1
-10	3	17404	1044	17435	3,4
-10	10	18418	822	18436	2,6
-10	25	19302	612	19312	1,8
-10	30	19789	493	19795	1,4
0	1	13432	1747	13545	7,4
0	3	14396	1580	14482	6,3
0	10	15616	1358	15675	5,0
0	25	16137	1260	16486	4,5
0	30	16605	1190	16647	4,1
10	1	10201	2303	10458	12,7
10	3	11418	2094	11608	10,4
10	10	13006	1832	13134	8,0
10	25	14313	1584	14400	6,3
10	30	14859	1495	14934	5,7
15	1	8146	2498	8521	17,0
15	3	9490	2415	9792	14,3
15	10	11144	2144	11348	10,9
15	25	12423	1923	12571	8,8
15	30	12944	1843	12875	8,1
20	1	5618	2367	6096	22,9
20	3	7090	2503	7219	19,4
20	10	9056	2459	8784	15,2
20	25	10102	2325	10366	13,0
20	30	10440	2261	10682	12,2
25	1	3629	1979	4133	28,6
25	3	5044	2264	5248	24,2
25	10	6819	2480	6756	20,0
25	25	7814	2500	8204	17,7
25	30	8275	2502	8545	16,8
30	1	2150	1521	2633	35,3
30	3	3021	1830	3532	31,2
30	10	4621	2203	4719	25,5
30	25	5562	2341	6034	22,8
30	30	6142	2421	6402	21,5
40	1	1200	935	1521	38,2
40	3	1382	1073	1909	37,8
40	10	2080	1502	2566	35,8

Tabela AP A1 – Resultados da análise reológica da mistura asfáltica GB (conclusão)

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de armazenamento	Módulo de perda	Módulo complexo	Ângulo de fase
		E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	$\|E^*\|$ (MPa)	δ (°)
40	25	2869	1780	3377	31,8
40	30	3178	1870	3607	30,5
50	1	591	462	751	39,1
50	3	857	659	1081	39,3
50	10	1107	857	1546	38,7
50	25	1585	1175	2156	36,3
50	30	1800	1344	2307	32,3
60	1	338	258	425	38,5
60	3	523	407	663	39,0
60	10	888	671	1093	39,2
60	25	1158	906	1558	39,0
60	30	1300	1013	1687	38,6

Fonte: LDTPav (2025a)

Tabela AP A2 – Resultados da análise reológica da mistura asfáltica EME (continua)

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de armazenamento	Módulo de perda	Módulo complexo	Ângulo de fase
		E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	$\|E^*\|$ (MPa)	δ (°)
-10	1	24019	1166	24047	2,8
-10	3	24969	982	24989	2,3
-10	10	26178	699	26188	1,5
-10	25	27102	474	27106	1,0
-10	30	28028	245	28029	0,5
0	1	19221	1838	19309	5,5
0	3	20764	1647	20830	4,5
0	10	22539	1406	22583	3,6
0	25	23875	1177	23904	2,8
0	30	25124	948	25142	2,2
10	1	13202	2365	13412	10,2
10	3	15171	2237	15335	8,4
10	10	17621	2027	17737	6,6
10	25	19121	1847	19210	5,5
10	30	20491	1681	20560	4,7
15	1	9208	2394	9514	14,6
15	3	11394	2417	11648	12,0
15	10	14129	2305	14316	9,3
15	25	15617	2192	15770	8,0
15	30	16863	2093	16993	7,1
20	1	5964	2127	6332	19,6
20	3	7955	2329	8288	16,3

Tabela AP A2 – Resultados da análise reológica da mistura asfáltica EME (conclusão)

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Módulo de armazenamento	Módulo de perda	Módulo complexo	Ângulo de fase
		E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	$\|E^*\|$ (MPa)	δ (°)
20	10	10720	2425	10991	12,7
20	25	12006	2404	12244	11,3
20	30	13226	2358	13435	10,1
25	1	3306	1564	3657	25,3
25	3	4804	1934	5179	21,9
25	10	7234	2272	7582	17,4
25	25	8195	2343	8523	16,0
25	30	8985	2380	9295	14,8
30	1	2296	1229	2604	28,2
30	3	3161	1542	3517	26,0
30	10	4691	1909	5065	22,1
30	25	5520	2060	5892	20,5
30	30	6425	2165	6780	18,6
40	1	961	503	1085	27,6
40	3	1305	710	1486	28,6
40	10	1897	1051	2168	29,0
40	25	2444	1323	2779	28,4
40	30	2628	1356	2957	27,3
50	1	515	227	563	23,7
50	3	698	332	773	25,4
50	10	954	491	1073	27,2
50	25	1192	634	1350	28,0
50	30	1257	683	1430	28,5
60	1	373	131	396	19,4
60	3	517	217	561	22,8
60	10	699	316	767	24,3
60	25	881	428	980	25,9
60	30	934	455	1039	26,0

Fonte: LDTPav (2025a)

APÊNDICE B – FADIGA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS GB E EME

Tabela AP B1 – Resultados da mistura asfáltica GB a 10 ºC e 25 Hz

Nível de deformação (x 10^{-6} μdef)	Número de ciclos (N)
100	8518500
100	6973500
100	5554500
100	5263500
100	2937000
100	1075500
100	3334500
100	1446000
130	729000
130	605000
130	819000
130	395000
130	294000
130	223500
130	276000
130	159000
160	93000
160	37500
160	157500
160	55500
160	165000
160	94500
160	247500
160	147000
160	216000

Fonte: LDTPav (2025a)

Tabela AP B2 – Resultados da mistura asfáltica GB a 20 ºC e 25 Hz

Nível de deformação (x 10^{-6} μdef)	Número de ciclos (N)
100	6750000
100	2920000
100	6300000
100	6420000
100	14700000
100	1470000
100	1380000
130	1630000
130	608000
130	290000
130	357000
130	267000
130	549000
130	1035000
130	807000
130	1098000
160	171000
160	158000
160	690000
160	278000
160	284000
160	78000
160	465000
160	362000

Fonte: LDTPav (2025a)

Tabela AP B3 – Resultados da mistura asfáltica GB a 25 ºC e 25 Hz

Nível de deformação (x 10^{-6} μdef)	Número de ciclos (N)
100	14248500
100	14206500
100	20895000
100	9742500
100	4167000
100	18934500
100	22090500
100	5167500
130	1350000
130	3043500
130	2491500
130	633000
130	387000
130	2151000
130	553500
130	358500
160	592500
160	162000
160	331500
160	979500
160	991500
160	634500
160	363000

Fonte: LDTPav (2025a)

Tabela AP B4 – Resultados da mistura asfáltica EME a 10 ºC e 25 Hz

Nível de deformação (x 10^{-6} μdef)	Número de ciclos (N)
130	2535000
130	1417500
130	1972500
130	1734000
130	1251000
130	1071000
145	891000
145	612000
145	709000
145	364500
145	904500
145	468500
160	540000
160	420000
160	241500
160	522000
160	285000
160	423000

Fonte: LDTPav (2025a)

Tabela AP B5 – Resultados da mistura asfáltica EME a 15 ºC e 25 Hz

Nível de deformação (x 10^{-6} μdef)	Número de ciclos (N)
130	1413000
130	2805000
130	3613500
130	1959000
130	4225500
130	1921500
160	1051500
160	367500
160	1570500
160	523500
160	1060500
160	747000
160	379500
160	399000
190	538500
190	558500
190	556500
190	205500
190	670500
190	346500

Fonte: LDTPav (2025a)

Tabela AP B6 – Resultados da mistura asfáltica EME a 20 ºC e 25 Hz

Nível de deformação (x 10^{-6} μdef)	Número de ciclos (N)
160	4426500
160	3915000
160	1926000
160	1476000
160	3306000
160	5080500
190	1401000
190	1399500
190	1009500
190	640500
190	487500
190	700500
190	589500
190	469500
220	255000
220	366000
220	535500
220	652500
220	475500
220	318000

Fonte: LDTPav (2025a)

APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS GB E EME

Tabela AP C1 – Resultados da mistura asfáltica GB (continua)

Identificação	Data de moldagem	Dimensões		Volumetria (ASTM D2726-11, 2011; DNIT 428/2022 – ME)											
		d (mm)	h (mm)	Ps (g)	$Msss$ (g)	$Mssssub$ (g)	Temperatura da água (°C)	Coeficiente para densidade da água	Gmb (g/cm³)	Abs. (%)	Gmm (g/cm³)	Vv (%) Gmm	Carga Máxima (kN)	RTI (MPa)
CP98	17/ago	100,00	63,28	1200,3	1202,7	725,1	25,1	0,99698	2,506	0,503	2,620	4,37	20,84	2,10
CP100	17/ago	100,00	62,82	1191,5	1194,7	720,6	25,1	0,99698	2,506	0,675	2,620	4,37	21,31	2,16
CP105	17/ago	100,00	63,00	1195,4	1197,2	721,4	25,1	0,99698	2,505	0,378	2,620	4,40	20,75	2,10
CP107	17/ago	100,00	63,57	1206,7	1208,8	729,6	25,1	0,99698	2,511	0,438	2,620	4,18	20,15	2,02
CP110	22/ago	100,00	63,35	1201,8	1204,3	726,4	25,0	0,99700	2,507	0,523	2,620	4,31	22,28	2,24
CP116	22/ago	100,00	63,15	1197,8	1200,1	723,9	25,0	0,99700	2,508	0,483	2,620	4,28	22,96	2,31
CP122	29/ago	100,00	62,93	1191,3	1193,7	719,0	23,3	0,99748	2,503	0,506	2,620	4,46	19,67	1,99
CP124	29/ago	100,00	63,13	1196,4	1199,3	722,9	23,3	0,99748	2,505	0,609	2,620	4,39	20,51	2,07
CP128	29/ago	100,00	62,57	1185,6	1187,5	715,7	23,3	0,99748	2,507	0,403	2,620	4,33	19,98	2,03
CP133	01/set	100,00	63,17	1199,4	1201,3	723,9	25,0	0,99700	2,505	0,398	2,620	4,40	21,25	2,14
CP136	01/set	100,00	62,35	1185,2	1187,7	716,1	25,0	0,99700	2,506	0,530	2,620	4,37	20,26	2,07
CP139	01/set	100,00	62,82	1196,1	1198,3	726,0	25,0	0,99700	2,525	0,466	2,620	3,63	20,37	2,06
CP142	01/set	100,00	63,03	1199,8	1202,5	728,8	25,0	0,99700	2,525	0,570	2,620	3,62	20,62	2,08
CP144	01/set	100,00	63,17	1199,8	1203,5	725,8	25,0	0,99700	2,504	0,775	2,620	4,42	19,52	1,97
CP150	05/set	100,00	63,09	1197,5	1200,4	724,0	25,0	0,99700	2,506	0,609	2,620	4,35	20,58	2,08
CP151	05/set	100,00	62,82	1195,1	1197,1	721,5	25,0	0,99700	2,505	0,421	2,620	4,38	20,34	2,06
CP152	05/set	100,00	62,59	1189,0	1191,4	719,8	25,0	0,99700	2,514	0,509	2,620	4,06	18,07	1,84
CP153	05/set	100,00	62,63	1190,0	1192,8	720,3	25,0	0,99700	2,511	0,593	2,620	4,16	18,85	1,92
CP154	05/set	100,00	63,36	1204,3	1206,5	728,5	25,0	0,99700	2,512	0,460	2,620	4,13	20,38	2,05
CP155	05/set	100,00	62,76	1194,2	1197,1	722,1	25,0	0,99700	2,507	0,611	2,620	4,33	19,45	1,97

Tabela AP C1 – Resultados da mistura asfáltica GB (conclusão)

Identificação	Data de moldagem	d (mm)	h (mm)	Volumetria (ASTM D2726-11, 2011; DNIT 428/2022 – ME)							Gmm (g/cm³)	Vv (%) Gmm	Carga Máxima (kN)	RTI (MPa)
				Ps (g)	$Msss$ (g)	$Mssssub$ (g)	Temperatura da água (ºC)	Coeficiente para densidade da água	Gmb (g/cm³)	Abs. (%)				
CP158	07/dez	100,00	63,06	1197,5	1201,2	724,9	26,5	0,99665	2,506	0,777	2,620	4,36	17,52	1,77
CP165	07/dez	100,00	62,53	1190,0	1192,6	719,5	26,5	0,99665	2,507	0,550	2,620	4,32	17,64	1,80
CP172	12/dez	100,00	62,77	1195,7	1198,5	727,1	26,5	0,99665	2,528	0,594	2,620	3,51	18,00	1,83
CP175	12/dez	100,00	63,13	1198,8	1201,4	724,8	26,5	0,99665	2,507	0,546	2,620	4,32	18,19	1,83
CP183	14/dez	100,00	62,62	1189,4	1192,2	719,1	26,6	0,99662	2,506	0,592	2,620	4,37	17,30	1,76
CP184	14/dez	100,00	62,77	1193,7	1195,6	724,5	26,6	0,99662	2,525	0,403	2,620	3,61	17,50	1,77
													Média	**2,00**
													Desvio – Padrão	**0,15**
													CV (%)	**7,3**

Fonte: LDTPav (2025b)

Tabela AP C2 – Resultados da mistura asfáltica EME (continua)

Identificação	Data de moldagem	Dimensões		Volumetria (ASTM D2726-11, 2011; 428/2022 – ME)											
		d (mm)	h (mm)	Ps (g)	$Msss$ (g)	$Mssssub$ (g)	Temperatura da água (ºC)	Coeficiente para densidade da água	Gmb (g/cm³)	Abs. (%)	Gmm (g/cm³)	Vv (%) Gmm	Carga Máxima (kN)	RTI (MPa)
CP85	04/ago	100,00	64,31	1196,3	1198,0	717,2	24,5	0,99715	2,481	0,354	2,574	3,61	19,01	1,88
CP91	04/ago	100,00	65,88	1232,8	1234,8	739,4	24,5	0,99715	2,481	0,404	2,574	3,60	20,63	1,99
CP95	04/ago	100,00	63,83	1189,4	1192,6	715,1	24,5	0,99715	2,484	0,670	2,574	3,50	19,96	1,99
CP96	04/ago	100,00	64,18	1196,7	1198,9	717,9	24,5	0,99715	2,481	0,457	2,574	3,62	19,84	1,97
CP102	08/ago	100,00	63,91	1193,1	1195,1	715,6	23,5	0,99740	2,482	0,417	2,574	3,58	19,83	1,98
CP103	08/ago	100,00	64,63	1203,8	1206,0	722,1	23,5	0,99740	2,481	0,455	2,574	3,60	19,52	1,92
CP107	08/ago	100,00	64,50	1204,0	1206,0	722,3	23,5	0,99740	2,483	0,413	2,574	3,55	19,22	1,90
CP108	08/ago	100,00	63,95	1191,7	1193,6	714,5	23,5	0,99740	2,481	0,397	2,574	3,62	20,35	2,03
CP115	13/set	100,00	63,75	1189,8	1191,7	714,1	25,7	0,99686	2,483	0,398	2,574	3,52	18,50	1,85
CP119	13/set	100,00	64,39	1199,7	1201,8	720,0	25,7	0,99686	2,482	0,436	2,574	3,57	19,82	1,96
CP128	15/set	100,00	64,00	1196,0	1197,6	717,4	25,7	0,99686	2,483	0,333	2,574	3,54	19,25	1,91
CP132	15/set	100,00	63,79	1205,8	1207,7	723,0	25,7	0,99686	2,480	0,392	2,574	3,66	20,36	2,03
CP134	20/set	100,00	64,58	1202,5	1204,1	719,1	26,6	0,99662	2,471	0,330	2,574	4,00	20,26	2,00
CP135	20/set	100,00	63,80	1191,5	1193,5	713,2	26,6	0,99662	2,472	0,416	2,574	3,95	19,44	1,94
CP136	20/set	100,00	64,01	1193,3	1194,8	715,3	26,6	0,99662	2,480	0,313	2,574	3,64	19,71	1,96
CP137	20/set	100,00	64,12	1196,2	1198,1	716,3	26,6	0,99662	2,474	0,394	2,574	3,87	20,65	2,05
CP138	20/set	100,00	64,07	1196,8	1198,5	716,8	26,6	0,99662	2,476	0,353	2,574	3,80	20,09	2,00
CP139	20/set	100,00	64,10	1196,2	1197,7	716,8	26,6	0,99662	2,479	0,312	2,574	3,69	19,41	1,93
CP140	20/set	100,00	64,18	1193,2	1194,8	715,5	26,6	0,99662	2,481	0,334	2,574	3,61	21,23	2,11
CP141	20/set	100,00	63,83	1191,5	1193,6	713,0	26,6	0,99662	2,471	0,437	2,574	4,01	20,88	2,08
CP142	20/set	100,00	63,90	1193,7	1197,1	715,1	26,6	0,99662	2,468	0,705	2,574	4,11	18,18	1,81
CP143	20/set	100,00	63,94	1193,5	1195,4	714,5	26,6	0,99662	2,473	0,395	2,574	3,91	21,22	2,11
CP144	20/set	100,00	64,25	1200,3	1202,6	720,0	26,6	0,99662	2,479	0,477	2,574	3,70	20,16	2,00

Tabela AP C2 – Resultados da mistura asfáltica EME (conclusão)

Identificação	Data de moldagem	Dimensões		Volumetria (ASTM D2726-11, 2011; 428/2022 – ME)							Gmm (g/cm³)	Vv (%) Gmm	Carga Máxima (kN)	RTI (MPa)
		d (mm)	h (mm)	Ps (g)	$Msss$ (g)	$Mssssub$ (g)	Temperatura da água (ºC)	Coeficiente para densidade da água	Gmb (g/cm³)	Abs. (%)				
CP147	19/dez	100,00	64,42	1200,9	1202,6	720,5	28,6	0,99602	2,481	0,353	2,574	3,61	17,45	1,72
CP148	19/dez	100,00	64,01	1194,0	1195,5	716,5	28,6	0,99602	2,483	0,313	2,574	3,54	19,55	1,94
CP149	19/dez	100,00	64,13	1191,4	1193,1	715,3	28,6	0,99602	2,484	0,356	2,574	3,51	17,81	1,77
CP143	20/set	100,00	63,94	1193,5	1195,4	714,5	26,6	0,99662	2,473	0,395	2,574	3,91	21,22	2,11
													Média	**1,95**
													Desvio – Padrão	**0,09**
													CV (%)	**4,8**

Fonte: LDTPav (2025b)

APÊNDICE D – MÓDULO DE RESILIÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS GB E EME

Tabela AP D1 – Resultados da mistura asfáltica GB

Identificação	Data de moldagem	Dimensões		Volumetria (ASTM D2726-11, 2011; 428/2022 – ME)							Gmm (g/cm³)	Vv (%) Gmm	RTI Médio (MPa)	$\%RTI$ (15%) (kPa)	MR (MPa)
		d (mm)	h (mm)	Ps (g)	$Msss$ (g)	$Mssssub$ (g)	Temp.da água (ºC)	Coef. para dens. da água	Gmb (g/cm³)	Abs. (%)					
CP157	07/12/2023	100,00	62,88	1195,6	1197,6	723,0	26,5	0,99665	2,511	0,421	2,620	4,17			7533
CP159	07/12/2023	100,00	62,51	1190,4	1193,0	722,0	26,5	0,99665	2,519	0,552	2,620	3,86			7523
CP160	07/12/2023	100,00	63,02	1201,7	1205,0	729,3	26,5	0,99665	2,518	0,694	2,620	3,90			7387
CP161	07/12/2023	100,00	62,83	1196,6	1199,5	725,3	26,5	0,99665	2,515	0,612	2,620	4,01			7466
CP162	07/12/2023	100,00	63,03	1199,1	1202,2	726,1	26,5	0,99665	2,510	0,651	2,620	4,19			7673
CP163	07/12/2023	100,00	63,05	1199,1	1201,6	726,5	26,5	0,99665	2,515	0,526	2,620	3,99			7332
CP164	07/12/2023	100,00	62,82	1195,0	1197,5	724,5	26,5	0,99665	2,518	0,529	2,620	3,89			8033
CP166	07/12/2023	100,00	63,13	1199,9	1202,6	727,5	26,5	0,99665	2,517	0,568	2,620	3,93			7875
CP167	07/12/2023	100,00	63,01	1199,2	1202,2	727,6	26,5	0,99665	2,518	0,632	2,620	3,88			6999
CP168	07/12/2023	100,00	63,03	1199,9	1203,5	728,2	26,5	0,99665	2,516	0,757	2,620	3,97	2,00	300,1	7608
CP169	12/12/2023	100,00	62,93	1194,7	1198,9	725,5	26,5	0,99665	2,515	0,887	2,620	4,00			8186
CP170	12/12/2023	100,00	63,03	1198,7	1201,1	726,2	26,5	0,99665	2,516	0,505	2,620	3,98			7415
CP171	12/12/2023	100,00	62,83	1196,9	1200,4	725,9	26,5	0,99665	2,514	0,738	2,620	4,05			8404
CP173	12/12/2023	100,00	62,80	1195,1	1198,1	724,1	26,5	0,99665	2,513	0,633	2,620	4,09			8318
CP176	12/12/2023	100,00	62,81	1195,8	1198,1	724,3	26,5	0,99665	2,515	0,485	2,620	3,99			8129
CP178	12/12/2023	100,00	62,55	1191,3	1193,9	721,6	26,5	0,99665	2,514	0,550	2,620	4,05			7590
CP179	12/12/2023	100,00	63,02	1201,7	1205,0	727,9	26,5	0,99665	2,510	0,692	2,620	4,19			7600
CP180	12/12/2023	100,00	63,07	1197,3	1200,0	725,9	26,5	0,99665	2,517	0,570	2,620	3,93			7618
CP181	14/12/2023	100,00	62,53	1189,3	1191,5	720,0	26,6	0,99662	2,514	0,467	2,620	4,05			8000
CP182	14/12/2023	100,00	63,10	1197,5	1199,0	723,6	26,6	0,99662	2,510	0,316	2,620	4,18	2,00	300,1	7447
														Média	**7707**
														Desvio – Padrão	**357**
														CV (%)	**4,63**

Fonte: LDTPav (2025b)

Tabela AP D2 – Resultados da mistura asfáltica EME

Identificação	Data de moldagem	Dimensões		Volumetria (ASTM D2726-11, 2011; DNIT 428/2022 – ME)							Gmm (g/cm³)	Vv (%) Gmm	RTI Médio (MPa)	%RTI (15%) (kPa)	MR (MPa)
		d (mm)	h (mm)	Ps (g)	$Msss$ (g)	$Mssssub$ (g)	Temp.da água (ºC)	Coef. para dens. da água	Gmb (g/cm³)	Abs. (%)					
CP145	19/12/2023	100,00	63,94	1190,7	1192,5	713,5	28,6	0,99602	2,476	0,376	2,574	3,81			7358
CP146	19/12/2023	100,00	64,01	1191,3	1193,6	713,2	28,6	0,99602	2,470	0,479	2,574	4,04			5464
CP150	19/12/2023	100,00	64,15	1192,3	1194,1	714,5	28,6	0,99602	2,476	0,375	2,574	3,80			5897
CP151	19/12/2023	100,00	64,49	1197,5	1199,3	716,0	28,6	0,99602	2,468	0,372	2,574	4,12			5288
CP152	19/12/2023	100,00	64,28	1198,2	1200,0	716,7	28,6	0,99602	2,469	0,372	2,574	4,07			5076
CP153	19/12/2023	100,00	64,04	1193,9	1195,4	713,2	28,6	0,99602	2,466	0,311	2,574	4,19			5852
CP155	19/12/2023	100,00	64,19	1200,0	1202,7	720,0	28,6	0,99602	2,476	0,559	2,574	3,80			5871
CP157	05/01/2024	100,00	64,23	1196,7	1198,7	717,3	28,8	0,99596	2,476	0,415	2,574	3,81			6545
CP159	05/01/2024	100,00	64,10	1191,9	1194,5	714,1	28,8	0,99596	2,471	0,541	2,574	4,00			5269
CP163	05/01/2024	100,00	63,95	1193,2	1195,4	714,9	28,8	0,99596	2,473	0,458	2,574	3,92	1,95	293,2	5922
CP164	05/01/2024	100,00	64,02	1192,4	1194,0	714,0	28,8	0,99596	2,474	0,333	2,574	3,88			5754
CP165	05/01/2024	100,00	64,53	1202,5	1204,0	719,3	28,8	0,99596	2,471	0,309	2,574	4,01			6666
CP168	05/01/2024	100,00	63,88	1189,8	1192,2	713,4	28,8	0,99596	2,475	0,501	2,574	3,85			6215
CP171	09/01/2024	100,00	64,28	1198,5	1200,8	716,8	28,8	0,99596	2,466	0,475	2,574	4,19			6602
CP172	09/01/2024	100,00	64,30	1198,7	1200,0	715,9	28,8	0,99596	2,466	0,269	2,574	4,19			6822
CP173	09/01/2024	100,00	64,11	1194,2	1196,1	713,8	28,8	0,99596	2,466	0,394	2,574	4,19			6446
CP174	09/01/2024	100,00	64,21	1199,2	1200,9	716,9	28,8	0,99596	2,468	0,351	2,574	4,13			5727
CP175	09/01/2024	100,00	63,99	1192,8	1194,0	714,0	28,8	0,99596	2,475	0,250	2,574	3,85			5650
CP176	09/01/2024	100,00	64,37	1198,6	1200,0	715,9	28,8	0,99596	2,466	0,289	2,574	4,20			5829
CP177	09/01/2024	100,00	64,31	1200,8	1202,0	718,3	28,8	0,99596	2,473	0,248	2,574	3,94	1,95	293,2	6345
														Média	**6030**
														Desvio – Padrão	**567**
														CV (%)	**9,45**

Fonte: LDTPav (2025b)

APÊNDICE E – FADIGA À COMPRESSÃO DIAMETRAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS GB E EME

Tabela AP E1 – Resultados da mistura asfáltica GB

Identificação	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm2)	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
CP211	10,00	6,28	20	394,45	4,001	0,000051951	1,60	684058
CP226	10,00	6,25	20	392,83	4,001	0,000051951	1,60	556973
CP195	10,00	6,28	20	394,77	4,001	0,000051951	1,60	500412
CP230	10,00	6,33	25	497,19	5,001	0,000064939	2,00	96920
CP212	10,00	6,24	25	490,44	5,001	0,000064939	2,00	95869
CP223	10,00	6,28	25	493,46	5,001	0,000064939	2,00	176182
CP227	10,00	6,30	30	593,78	6,001	0,000077927	2,40	27631
CP206	10,00	6,28	30	591,83	6,001	0,000077927	2,40	14903
CP215	10,00	6,30	30	594,27	6,001	0,000077927	2,40	22533
CP202	10,00	6,29	35	691,39	7,001	0,000090915	2,80	11799
CP204	10,00	6,28	35	690,84	7,001	0,000090915	2,80	11494
CP233	10,00	6,28	35	691,02	7,001	0,000090915	2,80	8660
CP209	10,00	6,28	40	789,32	8,002	0,000103903	3,20	4259
CP200	10,00	6,27	40	788,17	8,002	0,000103903	3,20	4049
CP225	10,00	6,29	40	790,26	8,002	0,000103903	3,20	3807

Fonte: LDTPav (2025b)

Tabela AP E2 – Resultados da mistura asfáltica EME

Identificação	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm2)	Deformação específica resiliente	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
CP210	6,41	10,00	20	393,87	3,910	0,000065501	1,56	499417
CP183	6,35	10,00	20	389,83	3,910	0,000065501	1,56	490207
CP186	6,37	10,00	20	391,11	3,910	0,000065501	1,56	713110
CP211	6,36	10,00	25	488,33	4,887	0,000081877	1,95	60382
CP204	6,40	10,00	25	491,47	4,887	0,000081877	1,95	87814
CP181	6,38	10,00	25	489,71	4,887	0,000081877	1,95	103421
CP188	6,43	10,00	30	592,04	5,865	0,000098252	2,35	23530
CP228	6,39	10,00	30	588,20	5,865	0,000098252	2,35	19144
CP198	6,39	10,00	30	588,35	5,865	0,000098252	2,35	23926
CP185	6,43	10,00	35	690,80	6,842	0,000114627	2,74	9396
CP179	6,43	10,00	35	690,53	6,842	0,000114627	2,74	6253
CP187	6,43	10,00	35	691,34	6,842	0,000114627	2,74	9709
CP238	6,35	10,00	40	779,97	7,820	0,000131003	3,13	5567
CP235	6,38	10,00	40	784,06	7,820	0,000131003	3,13	4545
CP214	6,38	10,00	40	783,65	7,820	0,000131003	3,13	5780

Fonte: LDTPav (2025b)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T 342. Standard method of test for determining dynamic modulus of hot-mix asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2022.

AFNOR NF EN 12697-24. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24: Résistance à la fatigue. Association Française de Normalisation (AFNOR). Paris, France, 2020.

AFNOR NF EN 12697-26. Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour enrobés à chaud - Partie 26: Module de rigidité. Association Française de Normalisation (AFNOR). Paris, France, 2018.

ARABZADEH, A.; GULER, M. Thermal fatigue behavior of asphalt concrete: a laboratory-based investigation approach. International Journal Of Fatigue, [S.L.], v. 121, p. 229-236, abr. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.11.022.

ASTM D2726-11. Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures. American Soceity for Testing and Materials (ASTM), 2011

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. Estatística para Cursos de Engenharia, Computação e Ciência de Dados. 4ª Edição. São Paulo: Editora LTC, 2024. 392 p.

BARRA, B.; NECKEL, G.; MOMM, L.; GUERRERO, Y.; MIKOWSKI, A.; MELO, J. V.; NGUYEN, M.; HUGHES, G. B. Design parameters and associated quantitative damage analyses of an asphalt concrete airfield runway. Construction and Building Materials, [S.L.], v. 262, p. 120809, nov. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120809.

BARRA, B.; MOMM, L.; GUERRERO, Y.; AL-QURESHI, H. A.; MIKOWSKI, A.; MICHELS, R. Temperature implications on rheological-mechanical behavior and design of high modulus dense asphalt mix. Construction and Building Materials, [S.L.], v. 125, p. 135-144, out. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.037.

BARRA, B.; MOMM, L.; GUERRERO, Y.; BERNUCCI, L. Fatigue behavior of dense asphalt mixes in dry and environmental-conditioning states. Construction and Building Materials, [S.L.], v. 29, p. 128-134, abr. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.003.

BOUDABBOUS, M.; MILLIEN, A.; PETIT, C.; NEJI, J. Energy approach for the fatigue of thermoviscoelastic materials: application to asphalt materials in pavement surface layers. International Journal of Fatigue, [S.L.], v. 47, p. 308-318, fev. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.09.013.

BOUSSABNIA, M. M.; PERRATON, D.; LAMOTHE, S.; BENEDETTO, H.; PROTEAU, M.; POUTEAU, B. Temperature effect on fatigue behavior of high-modulus asphalt concrete (HMAC). Construction and Building Materials, [S.L.], v. 409, p. 134006, dez. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134006.

CHAILLEUX, E.; LAROCHE, C. de; PIAU, J.-M. Study of the influence of experimental conditions applied to the indirect tensile test versus type of bituminous mixture. Materials and Structures, [S.L.], v. 44, n. 4, p. 719-734, 12 set. 2010. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1617/s11527-010-9661-1.

CHEN, H.; SABA, R. G.; LIU, G.; BARBIERI, D. M.; ZHANG, X.; HOFF, I. Influence of material factors on the determination of dynamic moduli and associated prediction models for different types of asphalt mixtures. Construction and Building Materials, [S.L.], v. 365, p. 130134, fev. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130134.

COULON, L.; KOVAL, G.; CHAZALLON, C.; ROUX, J.-N. Analytical modelling of complex stiffness modulus tests in direct tension-compression on asphalt concrete and nonlinearity effect due to strain amplitude. Road Materials and Pavement Design, [S.L.], v. 24, n. 1, p. 216-246, 29 dez. 2021. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2021.2014349.

DABIRI, A.; SILVA, H. M. R. D.; OLIVEIRA, J. R. M. Enhancing Pavement Durability: comparative rheological evaluation of conventional and rejuvenated reclaimed binders under aging conditions. Materials, [S.L.], v. 17, n. 13, p. 3305, 4 jul. 2024. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/ma17133305.

DI BENEDETTO, H.; BAAJ, H.; PRONK, A. e LUNDSTRÖM, R. Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM Group contribution. *In:* Proceedings of the 6th International RILEM Symposium, p. 15-38. Zurich, Switzerland, 2003.

DNIT 031 – ES. Pavimentação - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 2024.

DNIT. Manual de ajuda: Programa MeDiNA - Versão 1.1.9. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 2023. 38 p.

DNIT 428 – ME. Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2022.

DNIT 184 – ME. Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018.

DNIT 183 – ME. Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018.

DNIT 136 – ME. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018.

DNIT 135 – ME. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018.

Grupo de Desenvolvimento e Pesquisa em Pavimentação (GDPPav). Caracterização do comportamento mecânico de misturas asfálticas segundo metodologias francesas. Relatório Final do Plano de Atividades do Projeto Registrado sob o Termo de Cooperação 0050.0075479.12.9 e SAP nº 4600373381 entre a UFSC e a PETROBRÁS S.A., Grupo de Desenvolvimento e Pesquisa em Pavimentação, 2015. 135 p.

HU, J.; WANG, L.; GUO, C.; LIU, H. Quantitative study on fatigue characteristics of warm mix recycled asphalt. Construction and Building Materials, [S.L.], v. 431, p. 136532, jun. 2024. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136532.

HUET, C. Étude par une Méthode d'Impédance du Comportement Viscoélastique des Matériaux Hydrocarbonés. Faculté des Sciences de Paris, France, 1963. 68 p.

KHALID, H. A. A comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous materials. Materials and Structures, [S.L.], v. 33, n. 7, p. 457-465, ago. 2000. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/bf02480666.

Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav). Campanha de ensaios laboratoriais. *In*: Documento preparatório da tese de doutorado de Estéfani Clara, em andamento. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, SC, 2025a

Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav). Campanha de ensaios laboratoriais. *In*: Documento preparatório da qualificação de tese de doutorado de Huri Alexandre Raimundo, em andamento. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, SC, 2025b.

LU, Y.; LI, S.; JIANG, Y.; YANG, X.; LI, L. Rheological and Aging Properties of Nano-Clay/SBS Composite-Modified Asphalt. Materials, [S.L.], v. 17, n. 17, p. 4376, 4 set. 2024. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/ma17174376.

LV, H.; ZHANG, D.; TAN, Y.; CAI, L.; LIU, H. Development of a complex index to characterize the recovery evolution of asphalt binder after cyclic loading. International Journal of Fatigue, [S.L.], v. 156, p. 106664, mar. 2022. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106664.

MALJAARS, J.; VROUWENVELDER, A. C. W. M. Probabilistic fatigue life updating accounting for inspections of multiple critical locations. International Journal of Fatigue, [S.L.], v. 68, p. 24-37, nov. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.06.011.

MANUEL LPC. Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST. "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France, 2007. 199 p.

MELO, J. V. Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos. 2014. 414 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MIKOWSKI, A.; CASALI, R. M.; SOARES, P.; SILVA, W. B; BARRA, B. S. Methodology for error propagation analysis of the complex stiffness modulus of asphalt mixes. Construction and Building Materials, [S.L.], v. 290, p. 123156, jul. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123156.

MOTTA, L. M. G. Contribuição para a Estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas. *In:* Anais do 14º Encontro de Asfalto, IBP. Rio de Janeiro, 2009.

NEMATI, R.; DAVE, E. V. Nominal property based predictive models for asphalt mixture complex modulus (dynamic modulus and phase angle). Construction and Building Materials, [S.L.], v. 158, p. 308-319, jan. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.144.

OCHOA-AMBRIZ, L.; PÉREZ-REA, M.; HERNÁNDEZ-PADRÓN, G.; LIMÓN-COVARRUBIAS, P.; GALAVIZ-GONZÁLEZ, José Roberto; AVALOS-CUEVA, David. Rheological Evaluation of Softened Binders Blended with Aged Asphalt Selected with a High-Temperature Mixing Chart. Materials, [S.L.] v. 15, p. 1775, jan. 2022. https://doi.org/10.3390/ma15051775.

NOURA, S.; YAGHOUBI, E.; FRAGOMENI, S.; WASANTHA, P.L.P.; VAN STADEN, R. Fatigue and stiffness characteristics of asphalt mixtures made of recycled aggregates. International Journal Of Fatigue, [S.L.], v. 174, p. 107714, set. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107714.

OWAIS, M. Preprocessing and postprocessing analysis for hot-mix asphalt dynamic modulus experimental data. Construction and Building Materials, [S.L.], v. 450, p. 138693, nov. 2024. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138693.

PETIT, C.; MILLIEN, A.; CANESTRARI, F.; PANNUNZIO, V.; VIRGILI, A. Experimental study on shear fatigue behavior and stiffness performance of Warm Mix Asphalt by adding synthetic wax. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 34, p. 537-544, set. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.010.

RYS, D.; SZYDLOWSKI, C. Consideration of pseudo strain energy in determination of fatigue life and microdamage healing of asphalt mastics. International Journal of Fatigue, [S.L.], v. 181, p. 108164, abr. 2024. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108164.

SASIDHARAN, D; SARAVANAN, U.; KRISHNAN, J. Murali. A methodology for post-processing the four-point beam bending data and computing stiffness modulus using harmonic analysis. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 396, p. 132164, set. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132164.

SAYEGH, G. Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux. 1965. 206 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Faculté Des Sciences de Paris, Paris, 1966.

SOL-SÁNCHEZ, M.; FIUME, A.; MORENO-NAVARRO, F.; RUBIO-GÁMEZ, M.C.. Analysis of fatigue cracking of warm mix asphalt. Influence of the manufacturing technology. International Journal of Fatigue, [S.L.], v. 110, p. 197-203, maio 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.01.029.

XIAO, X.; LI, J.; CAI, D.; CHENG, H.; XIAO, F. Characterizing thermal fatigue behaviors of asphalt concrete waterproofing layer in high-speed railway using customized overlay test. International Journal of Fatigue, [S.L.], v. 165, p. 107176, dez. 2022. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107176.

ZENG, Z.; KIM, Y. R.; UNDERWOOD, B. S.; GUDDATI, M. Asphalt mixture fatigue damage and failure predictions using the simplified viscoelastic continuum damage (S-VECD) model. International Journal Of Fatigue, [S.L.], v. 174, p. 107736, set. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107736.

ZHANG, Z.; OESER, M. Energy dissipation and rheological property degradation of asphalt binder under repeated shearing with different oscillation amplitudes. International Journal of Fatigue, [S.L.], v. 152, p. 106417, nov. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106417.

ZHAO, K.; WANG, W.; WANG, L. Fatigue damage evolution and self-healing performance of asphalt materials under different influence factors and damage degrees. International Journal of Fatigue, [S.L.], v. 171, p. 107577, jun. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107577.